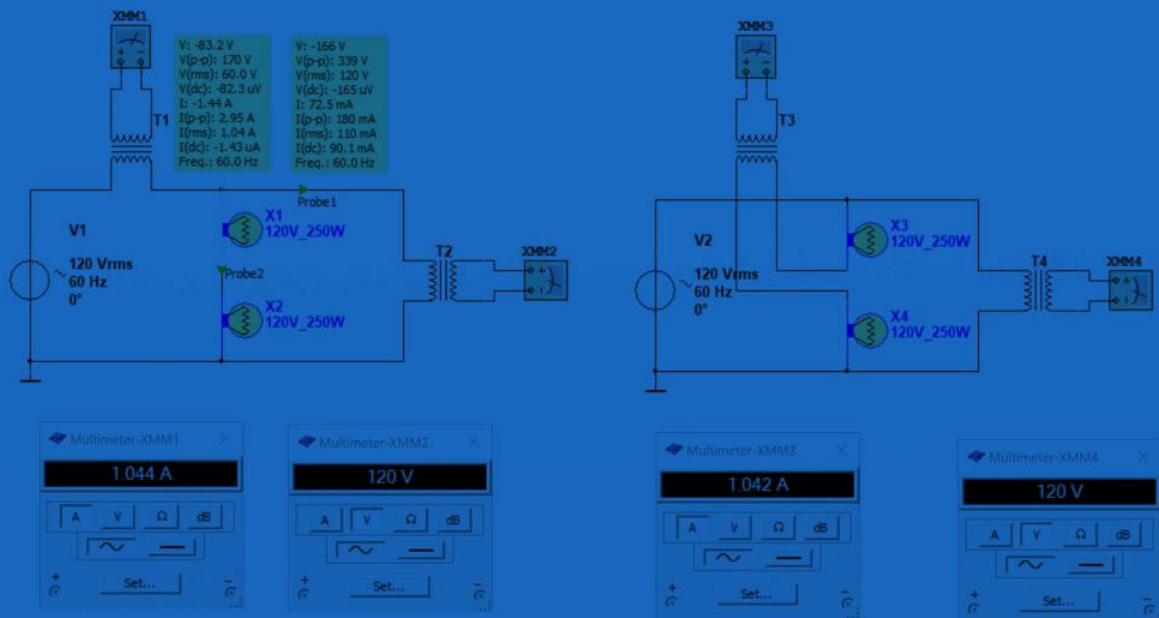




В.В. Макаренко

ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ

Лабораторний практикум



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

В.В. Макаренко

ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ
Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються
за спеціальністю 171 "Електроніка", освітніх програм
"Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації"
та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей"

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензенти:

*Романов В.О., д.т.н., професор, зав. відділом інституту
кібернетики НАН України*

Прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання

Відповідальний
редактор:

Трапезон К.О., к.т.н., доцент каф. АМЕС ФЕЛ

Прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 25.02.2021 р.)

за поданням Вченої ради факультету (протокол №01/2021 від 25.01.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Макаренко Володимир Васильович, канд. техн. наук, доц.

ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ

Лабораторний практикум

Вступ до техніки вимірювань: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 "Електроніка" освітніх програм "Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації" та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей" / В.В. Макаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,27 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 78 с.

У навчальному посібнику наведені теоретичні відомості та методики вимірювань параметрів електричних кіл та електронних пристроїв, наведені моделі для самостійного виконання індивідуальних завдань, правила користування віртуальними вимірювальними пристроями та методами аналізу у spice-симуляторі Multisim Analog Devices Edition. Посібник призначений для використання при дистанційному навчанні при відсутності можливостей використання реальних вимірювальних пристроїв, а також може бути використаний для самостійної роботи студентів для поглибленого засвоєння принципів та способів вимірювання електричних характеристик електронних пристроїв та вимірювання параметрів сигналів.

© В.В. Макаренко 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 6 |
| Лабораторна робота №1. Дослідження параметрів сигналів за допомогою осцилографа | 7 |
| 1.1 Теоретичні відомості. Генератори NI Multisim | 7 |
| 1.1.1 Джерело постійної напруги | 7 |
| 1.1.2 Потужний генератор змінної напруги AC_POWER..... | 10 |
| 1.1.3 Генератор змінної напруги AC_VOLTAGE | 11 |
| 1.1.4 Генератор амплітудно-модульованого коливання AM_VOLTAGE | 14 |
| 1.1.5 Функціональний генератор Function Generator..... | 15 |
| 1.2 Завдання 1. Дослідження синусоїдальних сигналів..... | 16 |
| 1.3 Завдання 2. Дослідження сигналів складної форми..... | 16 |
| Контрольні питання..... | 17 |
| Лабораторна робота №2. Вимірювання потужності..... | 19 |
| 2.1 Теоретичні відомості | 19 |
| 2.2 Завдання 1. Вимірювання активної потужності та $\cos\varphi$ | 20 |
| 2.3 Завдання 2. Вимірювання залежності потужності у навантаженні від внутрішнього опору джерела сигналу | 21 |
| 2.4 Завдання 3. Вимірювання потужності на елементі не під'єднаному до загального проводу | 23 |
| Контрольні запитання..... | 23 |
| Лабораторна робота №3. Вимірювання амплітудно-частотних характеристик у Multisim..... | 25 |
| 3.1 Теоретичні відомості | 25 |
| 3.1.1 Поняття про амплітудно-частотну характеристику та її параметри..... | 25 |
| 3.1.2 Основні поняття про фільтри та особливості їх частотних характеристик..... | 25 |
| 3.1.3 Вимірювання коефіцієнта підсилення та нерівномірності АЧХ | 27 |
| 3.2 Завдання..... | 30 |
| 3.3 Звіт про виконання лабораторної роботи | 31 |
| Контрольні запитання..... | 32 |
| Лабораторна робота №4. Вимірювання нелінійних спотворень у Multisim..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 4.1 Теоретичні відомості | 33 |
| 4.1.1 Поняття про коефіцієнт нелінійних спотворень | 33 |
| 4.1.2 Вимірювання коефіцієнта гармонік у Multisim | 34 |
| 4.1.3. Вимірювання коефіцієнта нелінійних спотворень за допомогою Distortion Analyzer | 36 |
| 4.2 Завдання на роботу | 37 |
| 4.3 Звіт про виконання лабораторної роботи | 38 |
| Контрольні запитання..... | 39 |
| Лабораторна робота №5. Вплив положення робочої точки підсилювачів звукової частоти на їх параметри | 40 |
| 5.1 Теоретичні відомості | 40 |
| 5.2 Завдання на роботу | 42 |
| 5.3 Звіт про виконання лабораторної роботи | 43 |
| Контрольні запитання..... | 44 |
| Лабораторна робота №6. Аналіз перехідних процесів | 45 |
| 6.1 Теоретичні відомості | 45 |
| 6.2 Завдання на роботу | 52 |
| 6.3 Звіт про виконання лабораторної роботи | 53 |
| Контрольні запитання..... | 54 |
| Лабораторна робота №7. Вимірювання ємності конденсаторів | 55 |
| 7.1 Теоретичні відомості | 55 |
| 7.1 Мостовий метод вимірювання ємності | 55 |
| 7.3 Вимірювання ємності резонансним методом | 58 |
| 7.4 Вимірювання ємності шляхом заряду конденсатора | 59 |
| 7.5 Завдання на роботу | 64 |
| 7.6 Звіт про виконання лабораторної роботи | 64 |
| Контрольні питання..... | 65 |
| Лабораторна робота №8. Вимірювання індуктивності котушок..... | 66 |
| 8.1 Теоретичні відомості | 66 |

| | |
|---|----|
| 8.1.1 Мостовий метод вимірювання індуктивності..... | 66 |
| 8.1.2 Вимірювання індуктивності мостовим методом..... | 68 |
| 8.1.3 Вимірювання індуктивності резонансним методом | 68 |
| 8.1.4 Вимірювання індуктивності шляхом вимірювання значення напруги | 69 |
| 8.2 Завдання на роботу | 73 |
| 8.3 Звіт про виконання лабораторної роботи | 74 |
| Контрольні питання..... | 74 |
| Література | 76 |

Вступ

Навчальний посібник "Вступ до техніки вимірювань. Лабораторний практикум" забезпечує цикл професійної підготовки бакалаврів спеціальності 171 "Електроніка" освітніх програм: "Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації" та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей".

Матеріал, що міститься у посібнику, дозволить не тільки познайомити студентів з правилами та теоретичними відомостями про технічні засоби вимірювання параметрів електронних пристроїв та характеристик електричних сигналів, а і на практичних прикладах дати їм можливість реалізувати набуті знання. Наведені приклади виконання вимірювань характеристик електричних сигналів за допомогою віртуальних вимірювальних пристроїв. Наведені універсальні методики аналізу характеристик на прикладах простих електронних пристроїв. Численні приклади моделей різних електронних пристроїв та вузлів, дозволять більш детально ознайомитись з процесами вимірювання і обробки результатів, отриманих в процесі роботи.

Мета навчального посібника полягає в закріпленні набутих при вивченні лекційного матеріалу знань, навчити студентів аналізувати роботу електронних пристроїв за допомогою імітаційного моделювання.

У цьому виникає необхідність тому, що при дистанційному навчанні студенти не мають можливості працювати з реальними вимірювальними приладами. Окрім того, навіть при роботі в аудиторії за час проведення занять, не всі встигають засвоїти як методики вимірювання, так і роботу з вимірювальними пристроями.

Використовуючи безкоштовну програму NI Multisim Analog Devices Edition студенти мають можливість самостійно працювати з віртуальними приладами інтерфейс яких відповідає інтерфейсам реальних вимірювальних пристроїв. Це єдина програма імітаційного моделювання, що має такий дружній до користувача інтерфейс.

Після засвоєння роботи з віртуальними пристроями нескладно перейти до роботи з реальними вимірювальними пристроями.

Розроблений цикл лабораторних робіт, дозволяє закріпити матеріал, який вивчається в рамках курсу, набути навичок роботи з вимірювальною апаратурою різного призначення (хоча і віртуальною) і освоїти методику організації і проведення експериментів у відповідності з поставленими завданнями.

Лабораторна робота №1. Дослідження параметрів сигналів за допомогою осцилографа

Мета роботи: ознайомитись з деякими генераторами сигналів Multisim, закріпити навички роботи з програмою, навчитись вимірювати параметри сигналів за допомогою осцилографа.

1.1 Теоретичні відомості. Генератори NI Multisim

Для успішного проведення досліджень треба знати які генератори сигналів можна використовувати в програмі NI Multisim і як управляти їх параметрами.

1.1.1 Джерело постійної напруги

Для дослідження електричних кіл на постійному струмі та для живлення електронних пристроїв використовується джерело постійної напруги (рис. 1.1).

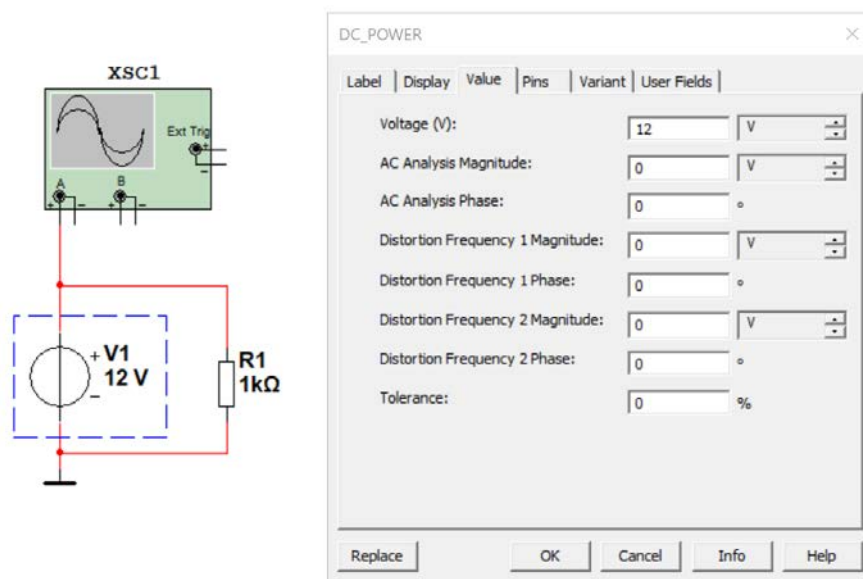


Рис. 1.1. Вкладка встановлення параметрів джерела DC_POWER

Якщо двічі клацнути лівою кнопкою "миші" по зображенню генератора V1 на робочому аркуші, то відкриється вікно налаштування його параметрів. Це стосується і інших генераторів та вимірювальних пристроїв. Тому в подальшому будемо просто розглядати вікно налаштування параметрів.

У вікні налаштування є п'ять вкладок, з яких практично використовуються тільки три: Label (позначення), Display (відображення на дисплеї) та Value (значення параметрів). Вікно

одразу відкривається на вкладці Value, яка і показана на рис. 1.1.

Перелічимо основні параметри, що доступні для зміни:

Voltage – постійна напруга джерела;

AC Analysis Magnitude – амплітуда сигналу змінної частоти для аналізу комбінаційних спотворень;

AC Analysis Phase – фаза сигналу змінної частоти для аналізу комбінаційних спотворень;

Distortion Frequency 1 Magnitude – амплітуда першої складової для аналізу комбінаційних спотворень;

Distortion Frequency 1 Phase – фаза першої складової для аналізу комбінаційних спотворень;

Distortion Frequency 2 Magnitude – амплітуда другої складової для аналізу комбінаційних спотворень;

Distortion Frequency 2 Phase – фаза другої складової для аналізу комбінаційних спотворень;

Tolerance – відхилення у процентах від заданого значення напруги.

Постійну напругу можна задати в межах від одиниць pV (піковольт) до сотень TV (теравольт). Для задання напруги достатньо вписати потрібне значення у вікно Voltage і обрати одиницю вимірювання (В, мВ, мкВ, кВ або іншу).

На вкладці Label можна вручну змінити позначення або номер генератора, а на вкладці Display можна відключити відображення на екрані дисплею величини та буквеного позначення генератора, як показано на рис. 1.2.

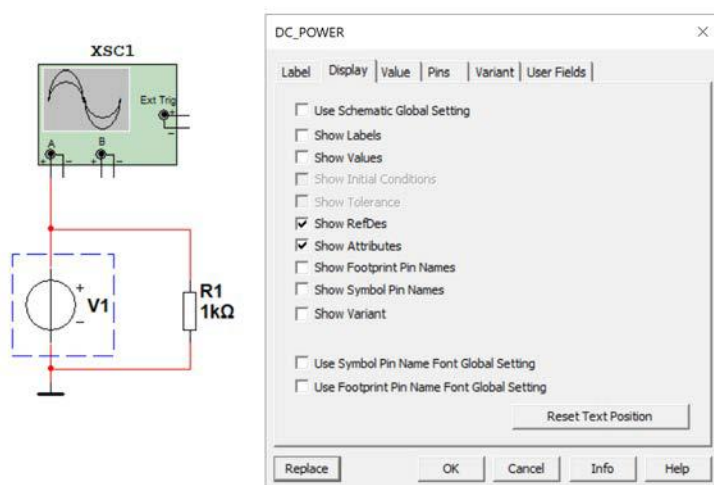


Рис. 1.2. Вкладка Display з відключеним відображенням значення напруги

Після встановлення необхідних параметрів необхідно натиснути кнопку ОК і генератор

буде готовий до роботи.

При необхідності замінити використовуваний генератор на генератор іншого сигналу (наприклад, генератор AC_POWER), достатньо натиснути кнопку Replace і у вікні, що відкріється, обрати потрібний пристрій (рис. 1.3).

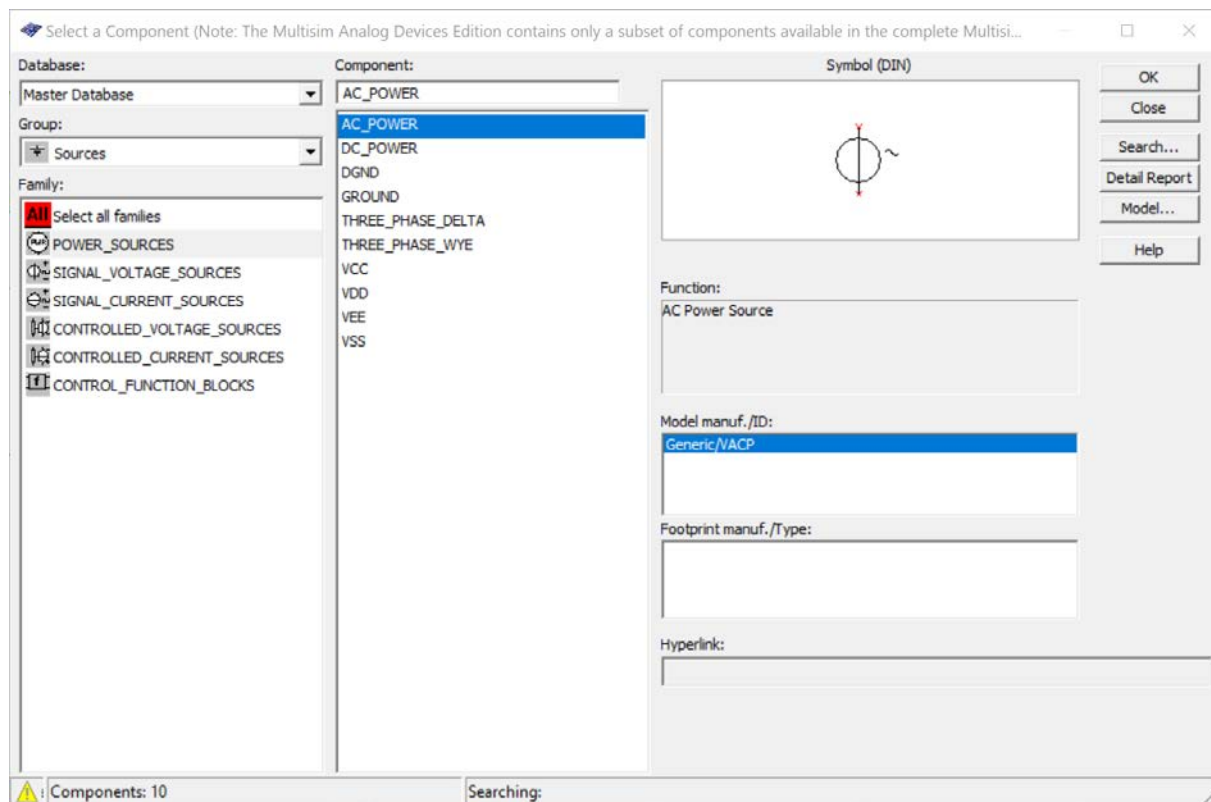


Рис. 1.3. Вікно вибору пристрою після натискання кнопки Replace

Для вимірювання напруги за допомогою осцилографа треба двічі клацнути по піктограмі осцилографа та у вікні що відкріється (рис. 1.4), відключити на осцилографі синхронізацію (натиснути None у правому нижньому кутку панелі осцилографа) і змінюючи чутливість у каналі А, добитися того, щоб лінія розгортки піднялася над віссю посередині екрану на 1...2 клітинки. Перемістити курсор у будь яку точку екрану і прочитати значення напруги у вікні відображення вимірюваних параметрів. Вхід осцилографа повинен бути у положенні DC. Якщо включити вхід осцилографа AC, то на вході осцилографа буде включений конденсатор і постійна напруга не буде вимірюватись, бо постійний струм через конденсатор не проходить.

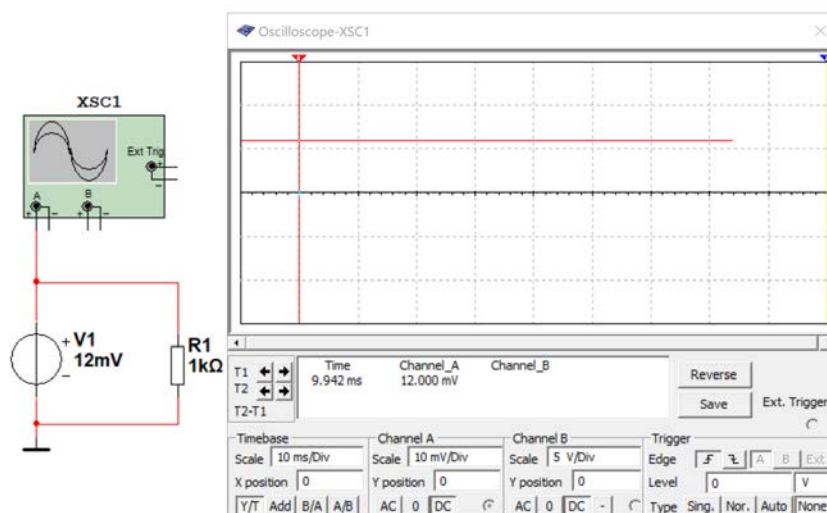


Рис. 1.4. Вимірювання постійної напруги двоканальним осцилографом

Як видно з рис. 1.4 значення напруги встановленої на виході генератора і виміряної за допомогою осцилографа співпадають.

1.1.2 Потужний генератор змінної напруги AC_POWER

Цей генератор призначений для імітації мережі змінного струму з частотою 50 або 60 Гц, хоча частота може бути задана довільно користувачем. На рис. 1.5. наведено вікно налаштування параметрів генератора.

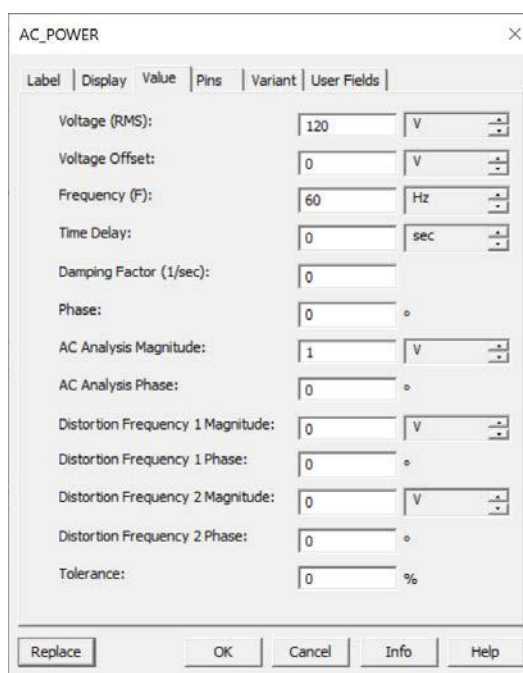


Рис. 1.5. Вікно налаштування генератора AC_POWER

У цьому генераторі окрім значення напруги (середньоквадратичного значення) можна задати напругу зміщення Voltage Offset (тобто постійну складову) та частоту слідування Frequency. Інші параметри аналогічні параметрам генератора DC_POWER.

Результат вимірювання напруги на виході генератора AC_POWER наведений на рис. 1.6.

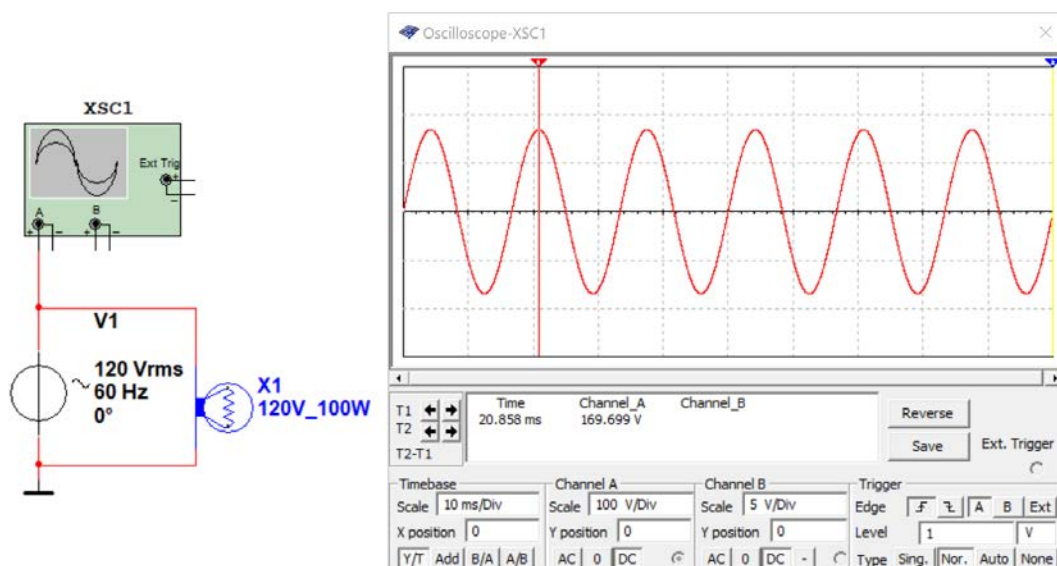


Рис. 1.6. Модель з підключенням до генератора AC_POWER навантаження та результати вимірювання амплітуди сигналу

Для вимірювання амплітуди сигналу потрібно включити синхронізацію осцилографа NOR, і рівень синхронізації більше ніж 1 мВ (на рис. 1.6 рівень синхронізації встановлено рівним 1 В). Після синхронізації сигналу перемістити курсор у верхню точку сигналу. У вікні відображення результатів прочитати виміряне значення. На рис. 1.6 виміряне значення складає 169,7 В. Для того щоб перерахувати виміряне амплітудне значення у середньоквадратичне, необхідно поділити отримане значення на корінь із двох, тобто $169,7 / 1,4142 = 119,99$ В. Тобто відносна похибка вимірювання не перевищує 0,008%.

1.1.3 Генератор змінної напруги AC_VOLTAGE

Генератор призначений для формування синусоїдальних сигналів в діапазоні частот від pHz (10^{-12} Гц) до THz (10^{12} Гц). Вікно налаштування параметрів генератора наведено на рис. 1.7.

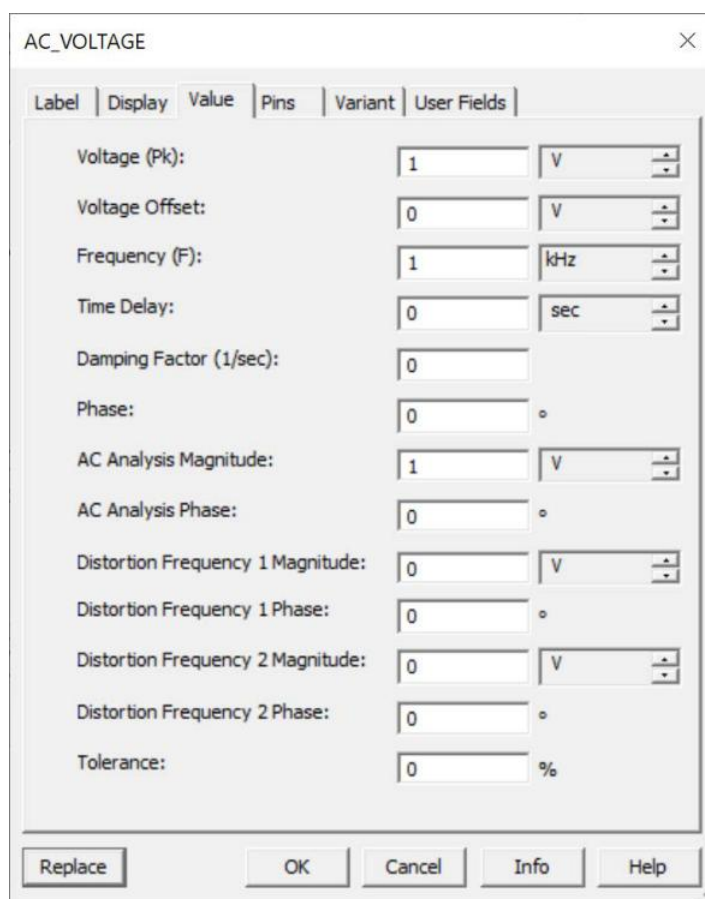


Рис. 1.7. Вікно налаштування генератора AC_VOLTAGE

Параметри налаштування аналогічні параметрам генератора AC_POWER. Додатково можна задати затримку сигналу Time Delay.

Треба пам'ятати, що у Multisim фази сигналів всіх підключених генераторів дорівнюють 0. Скористаємося цим і використаємо два генератори AC_VOLTAGE для ілюстрації затримки сигналу.

Встановимо на першому і другому генераторах частоту сигналу 1 кГц, що відповідає тривалості періоду 1 мс. У другому генераторі встановимо затримку 0.5 мс. Модель та результати вимірювання за допомогою осцилографа наведені на рис. 1.8.

Затримка на 0.5 мс відповідає половині періоду сигналу з частотою 1 кГц, що і ілюструють осцилограми сигналів першого (червона) і другого генераторів на рис. 1.8.

Для точного знаходження потрібної точки на осцилограмі у часі, або за рівнем, потрібно скористатися контекстним меню, що може бути викликане при розміщенні курсору "миші" на курсорі осцилографа і натисканні правої кнопки "миші" (рис. 1.9).

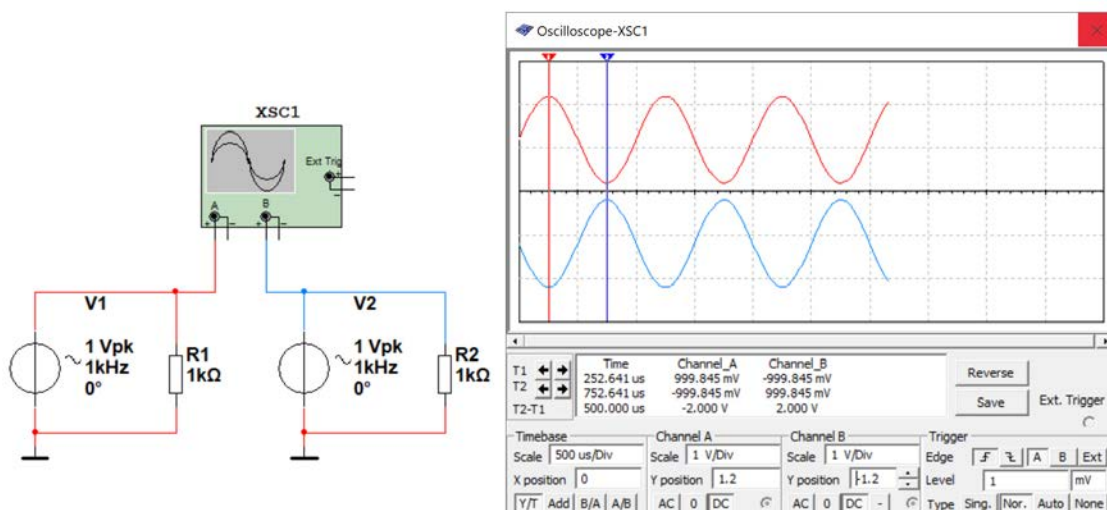


Рис. 1.8. Модель для дослідження з двома генераторами AC_VOLTAGE

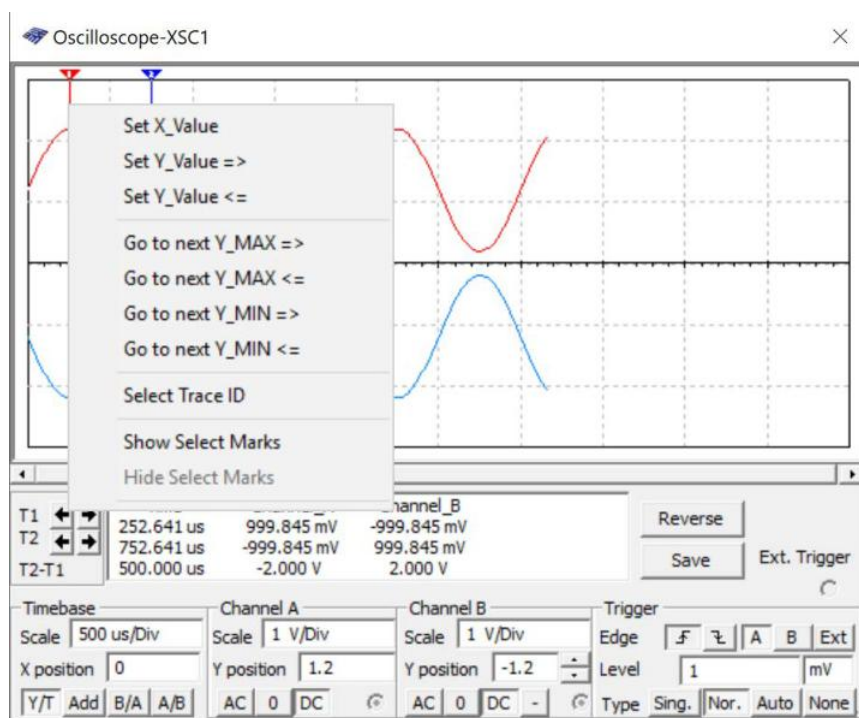


Рис. 1.9. Контекстне меню курсорів осцилографа

За допомогою цього меню можна автоматично перемістити обраний курсор у точку з заданим значенням часу чи рівня сигналу (зліва або з правого боку від курсору), перемістити у точку з мінімальним чи максимальним значенням. Меню інтуїтивно зрозуміле і не потребує детальних пояснень.

1.1.4 Генератор амплітудно-модульованого коливання AM_VOLTAGE

Генератор АМ-сигналу призначений для формування амплітудно-модульованого сигналу в діапазоні зміни частоти носійного коливання (Carrier Frequency) від одиниць pHz (10^{-12} Гц) до сотень THz (10^{12} Гц). В такому ж діапазоні може змінюватись і частота модулюючого коливання (Intelligence Frequency). Вікно налаштування генератора AM_VOLTAGE наведене на рис. 1.10.

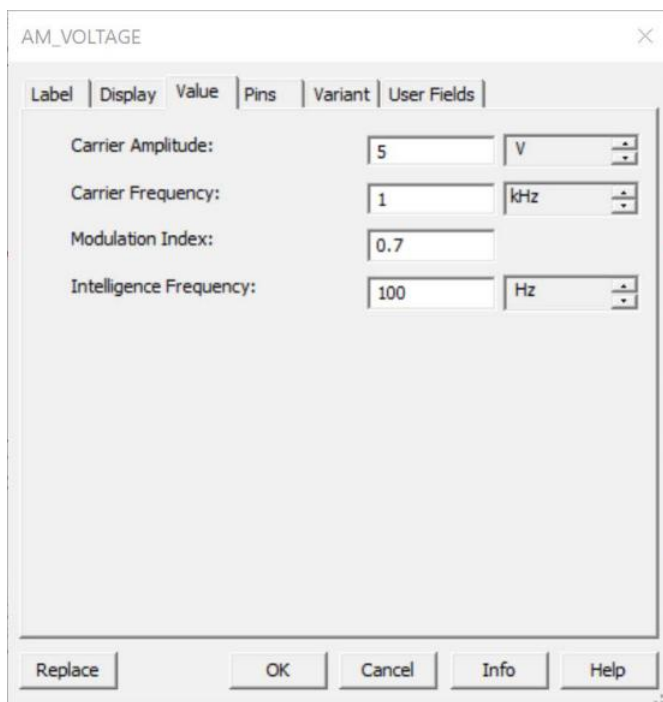


Рис. 1.10. Вікно налаштування параметрів генератора AM_VOLTAGE

Індекс модуляції (Modulation Index) показує наскільки змінюється амплітуда носійного коливання під впливом модулюючого коливання. На рис. 1.11 наведена форма АМ-сигналу.

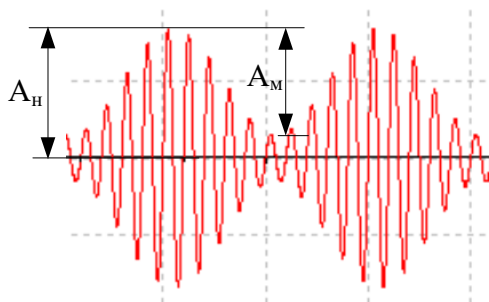


Рис. 1.11. Амплітудно-модульований сигнал

Під індексом модуляції треба розуміти як відношення $M = A_m/A_n$, де A_n – амплітуда носійного коливання, A_m – амплітуда огибаючої АМ-сигналу (рис. 1.11).

1.1.5 Функціональний генератор Function Generator

Позначення функціонального генератора, та вікно налаштування його параметрів наведено на рис. 1.16. У вікні налаштування параметрів здійснюється вибір форми сигналу – синусоїдальний, трикутний або прямокутний, та задається його частота і амплітуда.

Частота сигналу задається в рядку Frequency у діапазоні від 1 фГц (відповідає значенню 10^{-15} Гц) до 10^3 ТГц (терагерць). Амплітуда в діапазоні від 1 фВ до 10^3 ТВ. Напруга зсуву задається в тому ж діапазоні. За замовчуванням на виході генератора формується двополярна напруга. Наприклад, як показано на рис. 1.16, задана амплітуда 10 В для синусоїдального сигналу. На виході генератора буде сформований сигнал з амплітудою ± 10 В. Якщо потрібно сформувати однополярний сигнал (наприклад, прямокутні імпульси амплітудою 5 В), потрібно задати амплітуду сигналу, що дорівнює половині необхідної (для прикладу 2,5 В), і задати позитивний зсув напруги рівний +2,5 В.

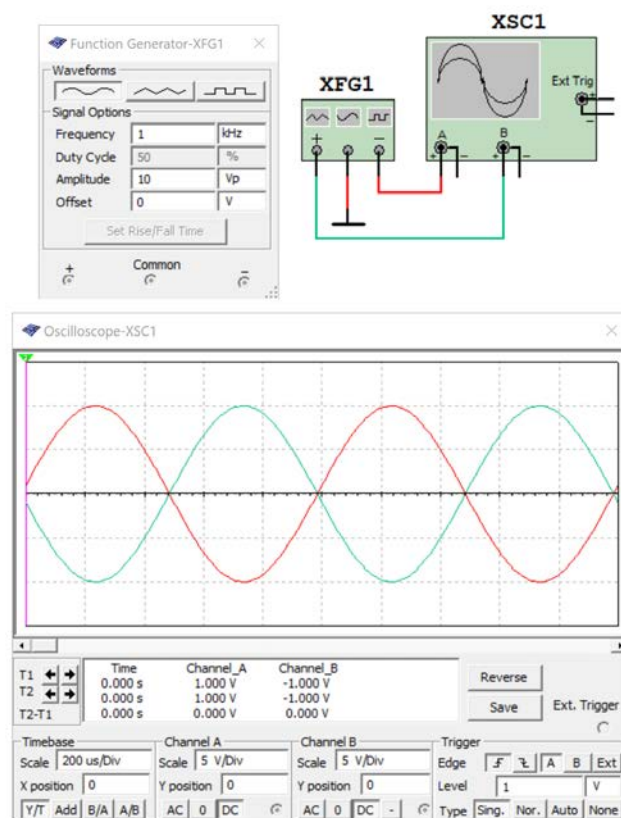


Рис. 1.16. Вікно налаштування параметрів функціонального генератора та осцилограми сигналів на виходах функціонального генератора

У функціонального генератора у передбачено два виходи, сигнали на яких формуються однакової форми, амплітуди і частоти, а фази сигналів зміщені на 180 градусів. Тобто сигнали

протифазні, що ілюструють осцилограми сигналів на рис. 1.16.

1.2 Завдання 1. Дослідження синусоїдальних сигналів

1. Ознайомитись з правилами роботи з осцилографом (Додаток А навчального посібника).
2. Зібрати модель наведену на рис. 1.17.

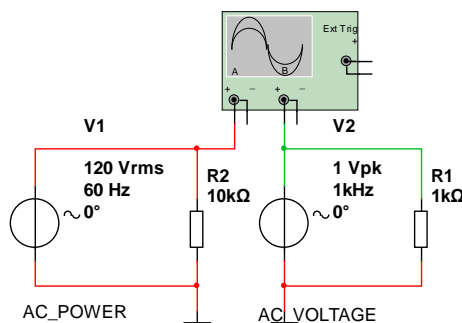


Рис. 1.17. Модель для дослідження синусоїдальних сигналів

3. Встановити параметри сигналів у відповідності з даними табл. 1.1 для свого варіанту завдання.
4. Включити режим моделювання, зробити фон вікна осцилографа білим, синхронізувати осцилограф у режимі Nor.
5. Виміряти амплітуди сигналів, скориставшись контекстним меню курсорів осцилографа. Навести коментар про методи вимірювання параметрів до скріншоту.
6. Скріншот моделі з результатами вимірювання на осцилографі розмістити у звіті. Розрахувати середньоквадратичне значення напруги на виході генератора AC_POWER за результатами вимірювання. Розрахувати відносну погрішність вимірювання.

1.3 Завдання 2. Дослідження сигналів складної форми

1. Зібрати модель наведену на рис. 1.18.
2. Встановити параметри сигналів у відповідності з даними табл. 1.1 для свого варіанту завдання.
3. Синхронізувати сигнали на екрані осцилографа. Правила синхронізації можна подивитись

4. Виміряти період слідування сигналу на виході генератора XFG1 та максимальне і мінімальне значення сигналу..
5. Виміряти індекс модуляції АМ-сигналу за допомогою осцилографа.

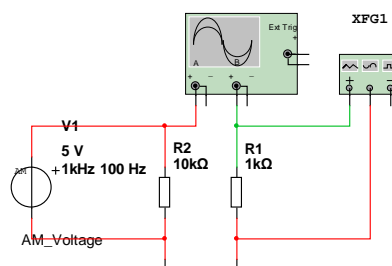


Рис. 1.18. Модель для дослідження складних сигналів

6. Зробити скріншоти моделі з результатами вимірювання параметрів сигналів обох генераторів і розмістити її у звіті. Навести коментар про методи вимірювання параметрів до кожного скріншоту.
7. Відповісти на контрольні питання.
8. Зробити висновки з результатів вимірювання.
9. Зберегти моделі та файл звіту з іменами:

Лаб1_Прізвище_група.docx

Лаб1_Прізвище_група_M1.ms10 (модель для першого завдання)

Лаб1_Прізвище_група_M2.ms10 (модель для другого завдання)

Контрольні питання

1. Як можна виміряти амплітуду сигналу за допомогою осцилографа не використовуючи курсори?
2. Як знайти точне значення амплітуди сигналу на екрані осцилографа?
3. Як знайти максимальне значення виміряного осцилографом сигналу?
4. Як знайти мінімальне значення виміряного осцилографом сигналу?
5. Як знайти точне значення періоду слідування сигналу за допомогою осцилографа?
6. Як виміряти постійну складову сигналу за допомогою осцилографа?

Таблиця 1.1. Параметри сигналів генераторів

| № варіанту | Параметри функціонального генератора | | | | Параметри АМ-сигналу | | | | Параметри AC_POWER | | Параметри AC_Voltage | |
|---------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | Форма сигналу | Амплітуда сигналу, В | Частота сигналу, кГц | Напруга зміщення, В | Амплітуда, В | Частота носійного коливання, кГц | Частота модулюючого коливання, кГц | Індекс модуляції | Амплітуда сигналу, В | Частота сигналу, Гц | Амплітуда сигналу, В | Частота сигналу, Гц |
| 1. | ~ | 1 | 0,1 | 0,1 | 1 | 10 | 1 | 0,2 | 80 | 50 | 0,65 | 0,2 |
| 2. | Λ | 2 | 0,25 | 0,25 | 2 | 11 | 1,2 | 0,25 | 90 | 60 | 0,7 | 0,3 |
| 3. | Π | 3 | 0,5 | 0,5 | 3 | 12 | 1,4 | 0,3 | 100 | 70 | 0,75 | 0,4 |
| 4. | ~ | 4 | 1 | 0,75 | 4 | 13 | 1,6 | 0,35 | 110 | 80 | 0,8 | 0,5 |
| 5. | Λ | 5 | 1,5 | 1 | 5 | 14 | 1,8 | 0,4 | 120 | 90 | 0,85 | 0,6 |
| 6. | Π | 6 | 2 | 1,1 | 1,5 | 15 | 2 | 0,45 | 130 | 100 | 0,9 | 0,7 |
| 7. | ~ | 7 | 2,5 | 1,2 | 2 | 20 | 2,5 | 0,5 | 140 | 110 | 0,95 | 0,8 |
| 8. | Λ | 8 | 3 | 1,3 | 2,5 | 25 | 3 | 0,55 | 150 | 120 | 1,05 | 0,9 |
| 9. | Π | 9 | 3,5 | 1,4 | 3 | 30 | 3,5 | 0,6 | 160 | 130 | 1,1 | 1 |
| 10. | ~ | 10 | 4 | 1,5 | 3,5 | 35 | 4 | 0,65 | 170 | 140 | 1,2 | 2 |
| 11. | Λ | 9 | 4,5 | 1,6 | 4 | 40 | 4,5 | 0,7 | 180 | 150 | 1,3 | 3 |
| 12. | Π | 8 | 5 | 1,7 | 4,5 | 45 | 5 | 0,75 | 190 | 160 | 1,4 | 1,5 |
| 13. | ~ | 7 | 5,5 | 1,8 | 5 | 50 | 5,5 | 0,8 | 200 | 170 | 1,5 | 2,5 |
| 14. | Λ | 6 | 10 | 1,9 | 5,5 | 55 | 6 | 0,85 | 210 | 180 | 1,6 | 3,5 |
| 15. | Π | 5 | 15 | 2,1 | 6 | 60 | 6,5 | 0,9 | 220 | 190 | 0,65 | 1,2 |
| 16. | ~ | 4 | 30 | 2,2 | 7 | 65 | 7 | 0,95 | 230 | 200 | 0,7 | 2,2 |
| 17. | Λ | 3 | 35 | 2,3 | 8 | 70 | 8 | 1,05 | 240 | 300 | 0,75 | 3,2 |
| 18. | Π | 2 | 45 | 2,4 | 7,5 | 75 | 8,5 | 1,1 | 250 | 400 | 0,8 | 1,7 |
| 19. | ~ | 1 | 55 | 2,5 | 2 | 80 | 9 | 1,2 | 260 | 500 | 0,85 | 2,7 |
| 20. | Λ | 0,5 | 70 | 2,6 | 8,5 | 85 | 9,5 | 1,3 | 270 | 600 | 0,9 | 3,7 |
| 21. | Π | 0,1 | 80 | 2,7 | 3 | 90 | 10 | 1,4 | 280 | 700 | 0,95 | 1,9 |
| 22. | ~ | 0,05 | 90 | 2,8 | 9,5 | 95 | 10,5 | 1,5 | 290 | 800 | 1,05 | 2,9 |
| 23. | Λ | 0,01 | 100 | 2,9 | 4 | 100 | 11 | 1,6 | 300 | 900 | 1,1 | 3,9 |

Примітка: Π – прямокутний сигнал; ~ – гармонічний сигнал; Λ – трикутний сигнал.

Розташувати сигнали на екрані осцилографа у відповідності з рекомендаціями.

Лабораторна робота №2. Вимірювання потужності

Мета роботи: ознайомитись з методами та пристроями вимірювання потужності в програмі Multisim.

2.1 Теоретичні відомості

Потужність визначається як робота, виконана в одиницю часу. Потужність в електричних колах постійного струму визначається як добуток напруги, що падає на опорі навантаження, на струм, що протікає через цей опір – $P = UI$.

Потужність в електричних колах змінної напруги (промислової частоти) має три визначення:

- повна потужність $P_{\Pi} = UI$;
- активна потужність (дорівнює добутку напруги на струм у колі й на косинус фазового кута між ними $P_A = UI \cos \varphi$);
- реактивна потужність дорівнює $P_P = UI \sin \varphi$.

Ці три типи потужності зв'язані співвідношенням $P_{\Pi} = \sqrt{P_A^2 + P_P^2}$.

Повна потужність змінного струму вимірюється у ВА (вольт-амперах), активна потужність змінного струму та потужність постійного струму у Вт (Ват), а реактивна потужність у ВАР (вольт-амперах реактивних).

На низьких частотах потужність звичайно розраховується за обмірюваним значенням струму й напруги. На високих частотах, що перевищують 1 МГц, більш зручні й точні виміри потужності, а напругу й струм можна розрахувати. На частотах вище 1 ГГц поняття напруги й струму гублять зміст і потужність залишається практично єдиним вимірним параметром.

У колі змінного струму потужність безупинно міняється разом зі змінами напруги й струму. Прилади вимірюють середню або постійну потужність, що при роботі на радіочастотах означає усереднення по великій кількості циклів. Період, по якому здійснюється усереднення, залежить від типу сигналу. Для безперервного сигналу потужність осереднюється по великій кількості періодів високої частоти. У випадку амплітудно-модульованого сигналу усереднення потужності проводиться по декількох циклах, а для імпульсного сигналу – по великій кількості імпульсів.

Відносні результати виміру потужності часто виражають в дБ. Децибел зручний для виміру потужності, оскільки забезпечує більше компактну форму запису; щоб знайти посилення багатокаскадної схеми, досить скласти коефіцієнти підсилення окремих каскадів замість їхнього

перемножування. На відміну від напруги потужність в дБ обчислюється як $P(\text{дБ}) = 10\lg(P_1/P_2)$.

Нагадаємо, що при вимірюванні напруги (чи струму) $U(\text{дБ}) = 20\lg(U_1/U_2)$.

За рівень відліку потужності в системах зв'язку звичайно приймається потужність 1 мВт. Це потужність що розсіюється на резисторі опором 600 Ом якщо до нього прикласти напругу 0,775 В.

Потужність, відлічувана до цього рівня (до 1 мВт), виражається в одиницях дБп (децибел потужності). Вона визначається так само, як і потужність у децибелах, але в знаменник вираження (4.2) завжди підставляють 1 мВт: $P(\text{дБп}) = 10\lg(P_1/1 \text{ мВт})$.

Потужність в [дБп] може приймати негативні значення. Наприклад, якщо сигнал потужністю +5 дБп подається на атенюатор (пристрій, що вносить послаблення у сигнал) з ослабленням 20 дБп, то вихідний сигнал буде мати потужність -15 дБп, тобто на 15 дБ нижче ніж 1 мВт.

2.2 Завдання 1. Вимірювання активної потужності та $\cos\varphi$

Ознайомитись з теоретичним матеріалом (лекція 4). Створити в Multisim модель за схемою, що наведена на рис. 2.1, для вимірювання потужності змінного струму та $\cos\varphi$.

Встановити параметри елементів схеми у відповідності з варіантом завдання наведеним у табл. 2.1.

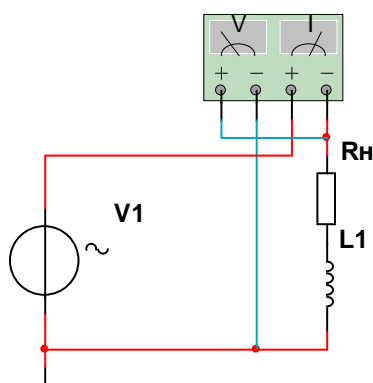


Рис. 2.1. Схема з'єднання компонентів для вимірювання $\cos\varphi$ та потужності на змінному струмі

Задати частоту генератора 50 Гц і провести вимірювання. **Перший дослід провести при значення індуктивності $L_1=0$. Показання ватметра при цьому вимірюванні буде відповідати повній потужності $P_{\text{п}}$, а $P_{\text{А}} = P_{\text{п}}$.**

Другий дослід провести при значенні L_1 наведеному у таблиці. При цьому досліді за рахунок зсуву фази струму відносно фази напруги виникає реактивна потужність. Отже при цьому активна потужність стане меншою ніж повна. Переконайтесь в цьому.

Аналогічні вимірювання провести для частоти сигналу 100, 150, 200, 250 та 300 Гц. Результати вимірювань звести у таблицю.

Таблиця 2.1. Залежність $\cos\varphi$ та P_A від частоти сигналу

| f, Гц | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
|---------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\cos\varphi$ | | | | | | |
| P_A , Вт | | | | | | |

Побудувати залежності $\cos\varphi$ та активної потужності від частоти сигналу на одному графіку.

Пояснити отримані результати і зробити висновки.

Звіт про виконання першого завдання

У звіті навести текст завдання, модель (рисунок) для вимірювання з Вашими параметрами, таблицю та графіки вимірюваних залежностей, пояснення та висновки. Графік підписати. До звіту додати діючу модель з назвою файлу **Лаб2_Прізвище_1завд_група.ms10**.

2.3 Завдання 2. Вимірювання залежності потужності у навантаженні від внутрішнього опору джерела сигналу

Створити в Multisim модель за схемою, що наведена на рис. 2.2, для вимірювання залежності потужності на навантаженні від внутрішнього опору джерела сигналу на частоті 100 Гц.

Параметри напруги і опору навантаження співпадають з параметрами для першого завдання. Внутрішній опір джерела сигналу R_i задавати у межах від 0 до $2R_{н1}$ з кроком $0,2 R_{н1}$. Результати вимірювання внести у таблицю.

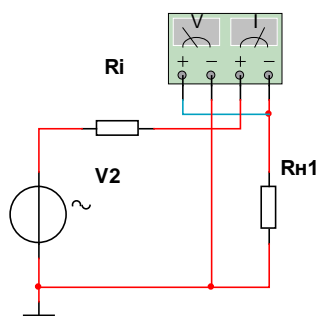


Рис. 2.2. Схема з'єднання компонентів для вимірювання залежності потужності від внутрішнього опору джерела сигналу

Таблиця 2.2. Залежність потужності у навантаженні від внутрішнього опору джерела сигналу

| Частота сигналу 100 Гц | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| R_i , Ом | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| P_A , Вт | | | | | | | | | | | |

У таблиці в рядку R_i замість цифр 0,2 і т.д. підставити значення свого опору $R_{н1}$.

Побудувати графік залежності потужності від нормованого опору $R_i/R_{н1}$.

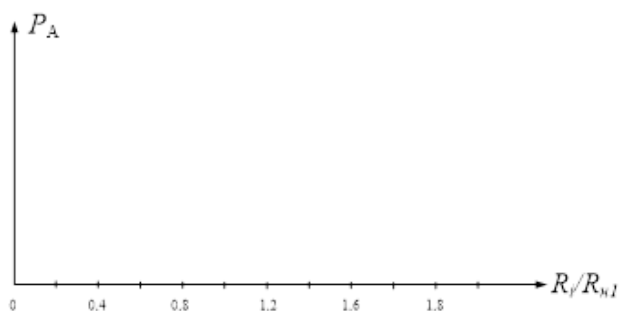


Рис. 2.3. Залежність потужності у навантаженні від внутрішнього опору джерела сигналу

Звіт про виконання другого завдання

У звіті навести текст завдання, модель (рисунок) для вимірювання з Вашими параметрами, таблицю та графік виміряної залежності, зробити висновки. Графік підписати. До звіту додати діючу модель з назвою файлу **Лаб2_Прізвище_2завд_група.ms10**.

2.4 Завдання 3. Вимірювання потужності на елементі не під'єднаному до загального проводу

Створити в Multisim модель за схемою, що наведена на рис. 2.4, для вимірювання потужності на заданому елементі схеми.

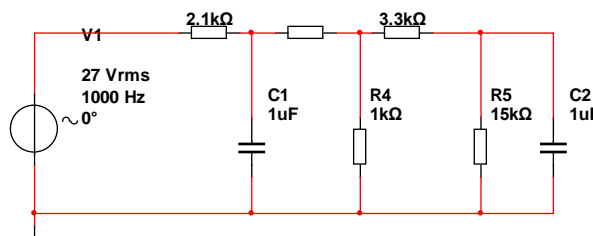


Рис. 2.4. Схема для створення моделі для вимірювання розсіюваної на резисторі R2 потужності

Здійснювати вимірювання двома способами. Один обираєте довільно і створюєте для нього модель. А у другому способі обов'язково використати осцилограф для знаходження падіння напруги на резисторі R2 і пробник струму (Current Probe). Приклад його використання наведений у відеофайлі до минулої лекції.

Звіт про виконання третього завдання

У звіті навести текст завдання, модель (рисунок) для вимірювання з Вашими параметрами, скріншоти з результатами вимірювання, необхідні розрахунки для обох способів вимірювання, зробити висновки. Відповісти на контрольні питання. До звіту додати діючу модель з двома способами вимірювання і з назвою файлу **Лаб2_Прізвище_Ззавд_група.ms10**.

Контрольні запитання

1. В чому різниця між генератором AC_POWER та AC_VOLTAGE?
2. Якщо джерело сигналу AC_VOLTAGE, то як потрібно розраховувати потужність?
Навести формулу.
3. Як здійснити гальванічну розв'язку вимірювальних пристроїв від кола, у якому здійснюються вимірювання?
4. Як виміряти різницю напруги (між різними точками схеми) за допомогою осцилографа?
5. Як виміряти струм за допомогою пробника струму?

Таблиця 2.1. Завдання на лабораторну роботу 2

| № вар. | Для першого завдання | | | R_2 , кОм | № вар. | Для першого завдання | | | R_2 , кОм |
|-----------|----------------------|-----------|---------|-------------|-----------|----------------------|-----------|---------|-------------|
| | R_H , Ом | L , мГн | U , В | | | R_H , Ом | L , мГн | U , В | |
| 1. | 27 | 30 | 75 | 1,1 | 2. | 82 | 91 | 195 | 3,3 |
| 3. | 30 | 33 | 85 | 1,2 | 4. | 91 | 100 | 205 | 3,6 |
| 5. | 33 | 36 | 95 | 1,3 | 6. | 100 | 110 | 215 | 3,9 |
| 7. | 36 | 39 | 105 | 1,5 | 8. | 110 | 120 | 225 | 4,2 |
| 9. | 39 | 43 | 115 | 1,6 | 10. | 120 | 130 | 235 | 4,7 |
| 11. | 42 | 47 | 125 | 1,8 | 12. | 130 | 150 | 245 | 5,1 |
| 13. | 47 | 51 | 135 | 2 | 14. | 150 | 180 | 255 | 5,6 |
| 15. | 51 | 56 | 145 | 2,1 | 16. | 180 | 210 | 265 | 6,2 |
| 17. | 56 | 62 | 155 | 2,2 | 18. | 200 | 240 | 275 | 6,8 |
| 19. | 62 | 68 | 165 | 2,4 | 20. | 210 | 270 | 285 | 7,5 |
| 21. | 68 | 75 | 175 | 2,7 | 22. | 240 | 300 | 295 | 8,2 |
| 23. | 75 | 82 | 185 | 3 | 24. | 82 | 91 | 195 | 3,3 |

Лабораторна робота №3. Вимірювання амплітудно-частотних характеристик у Multisim

Мета роботи: ознайомитись з методами вимірювання параметрів АЧХ у програмі Multisim.

3.1 Теоретичні відомості

3.1.1 Поняття про амплітудно-частотну характеристику та її параметри

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) це залежність напруги на виході кола чи пристрою від частоти при фіксованому рівні напруги на вході. Вимірюється або у [В], або у дБ (найчастіше). Тобто вимірюється функція $U_{\text{вих}}(f)$ при $U_{\text{вх}} = \text{Const}$.

При вимірюванні у дБ $U_{\text{вих}}[\text{дБ}] = 20\lg[U_{\text{вих}}(f)/0,775 \text{ В}]$.

Смуга пропускання. Під смугою пропускання (як правило) мається на увазі діапазон частот у якому рівень сигналу на виході пристрою менше у 1,41 рази від максимального (-3 дБ по логарифмічній шкалі).

3.1.2 Основні поняття про фільтри та особливості їх частотних характеристик

Для того щоб розуміти які вимірювання проводяться, необхідно спочатку ознайомитись з поняттями про фільтри.

У наш час використовуються наступні різновиди фільтрів: фільтри на зосереджених елементах, кварцові й керамічні, механічні, фільтри надвисоких частот (НВЧ), активні RC-фільтри (ARC-фільтри) на зосереджених і розподілених елементах, N-канальні й цифрові фільтри.

Електричний фільтр проектується для виділення й пропускання необхідного сигналу із суміші корисних і небажаних сигналів.

Смуга частот, яку займає корисний сигнал, називається **смугою пропускання** (СП), а смуга частот, яку займають небажані сигнали, – **смугою непропускання** (СН).

Залежно від взаємного розташування СП і СН розрізняють наступні фільтри:

- фільтр нижніх частот (ФНЧ);
- фільтр верхніх частот (ФВЧ);
- смуговий фільтр (СФ);
- режекторний фільтр (РФ).

Нижче будуть розглянуті частотні характеристики даних фільтрів і їх характерні точки.

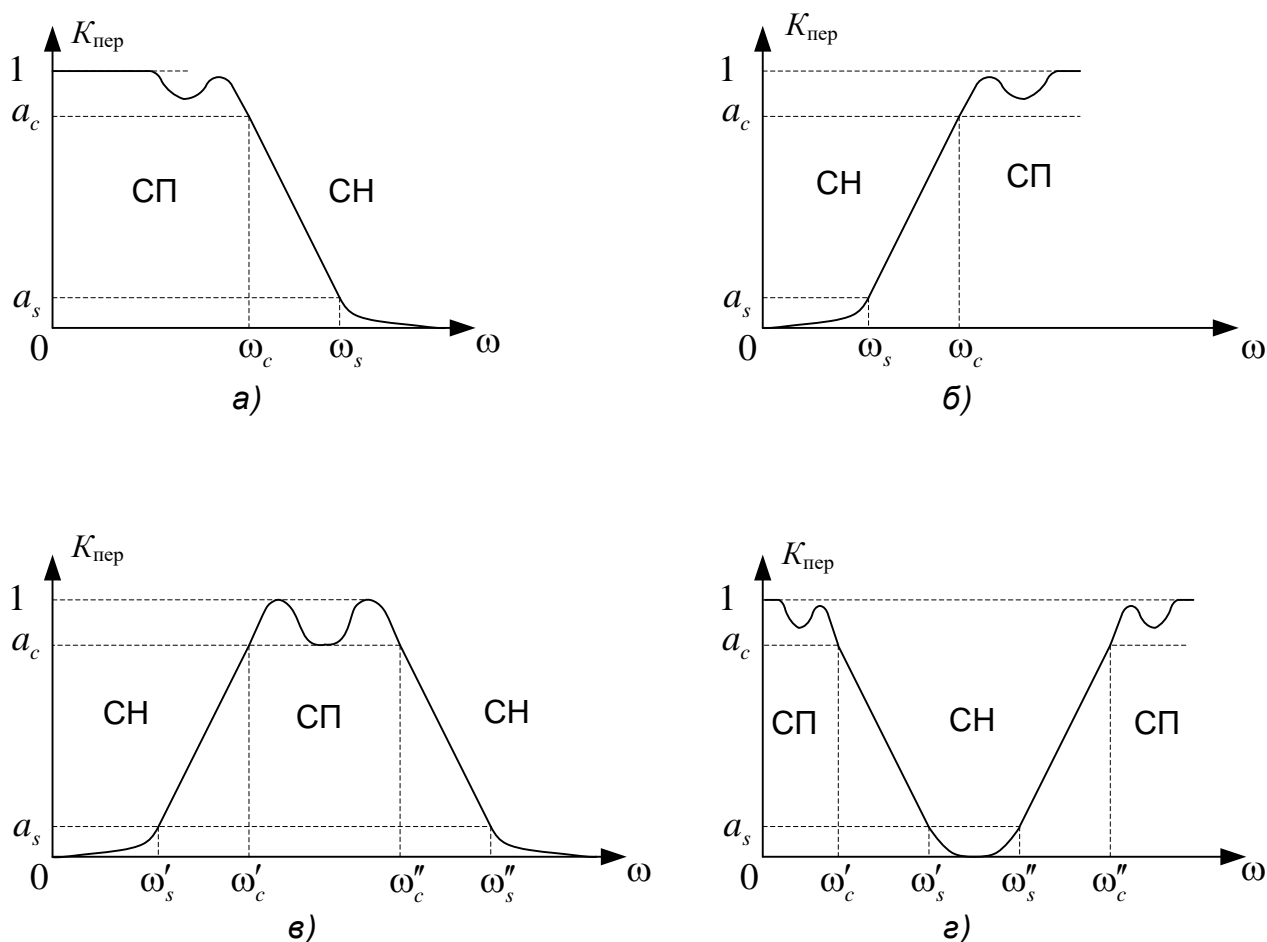


Рис. 3.1. АЧХ і параметри фільтрів, що визначають їхні характеристики та служать вихідними даними при розрахунках ФНЧ (а), ФВЧ (б), СФ (в), РФ (г)

Фільтр нижніх частот (рис. 3.1,а):

a_c – нерівномірність АЧХ у СП;

a_s – гарантоване затухання АЧХ у СН;

ω_c – частота зрізу (верхня межа СП);

ω_s – частота гарантованого затухання (нижня межа СН).

Фільтр верхніх частот (рис. 3.1,б):

a_c – нерівномірність АЧХ у СП;

a_s – гарантоване затухання АЧХ у СН;

ω_c – частота зрізу (нижня межа СП);

ω_s – частота гарантованого затухання (верхня межа СН).

Смуговий фільтр (рис. 3.1,в):

a_c – нерівномірність АЧХ у СП;

a_s – гарантоване затухання АЧХ у СН;

ω'_c – нижня частота зрізу (нижня межа СП);

ω_c'' – верхня частота зрізу (верхня межа СП);

ω_s' – нижня частота гарантованого затухання (верхня межа нижньої СН);

ω_s'' – верхня частота гарантованого затухання (нижня межа верхньої СН).

Режекторний фільтр (рис. 3.1,г):

a_c – нерівномірність АЧХ у СП;

a_s – гарантоване затухання АЧХ у СН;

ω_c' – нижня частота зрізу (верхня межа нижньої СП);

ω_c'' – верхня частота зрізу (нижня межа верхньої СП);

ω_s' – нижня частота гарантованого затухання (нижня межа СН);

ω_s'' – верхня частота гарантованого затухання (верхня межа СН).

Зв'язок між фізичною та круговою частотою здійснюється по формулі $\omega = 2\pi f$.

3.1.3 Вимірювання коефіцієнта підсилення та нерівномірності АЧХ

Коефіцієнт підсилення показує у скільки разів напруга на виході пристрою більша ніж на його вході. Позначається як K_U або як $K_{\text{пер}}$ і знаходиться за простою формулою $K_{\text{пер}} = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}}$. Вимірюється як у разях, так і у дБ – $K_{\text{пер}}[\text{дБ}] = 20\lg(U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}})$.

Нерівномірність АЧХ у смузі пропускання – це найбільше відхилення від $K_{\text{пер}}$ виміряне у дБ відносно максимального коефіцієнту передачі, що спостерігається у смузі пропускання.

Під смугою пропускання ФНЧ мається на увазі діапазон частот від 0 Гц (для вимірювання у Multisim найчастіше можна задати нижню частоту 1 Гц) до частоти на краю смуги пропускання, де коефіцієнт передачі складає задану величину a_c – нерівномірності.

Під частотою гарантованого затухання мають на увазі частоту сигналу на якій забезпечується задане затухання. Ця величина також вимірюється відносно максимуму коефіцієнта передачі.

Розглянемо на прикладі як можна виміряти параметри АЧХ фільтру.

На рис. 3.2 наведена АЧХ фільтру нижніх частот.

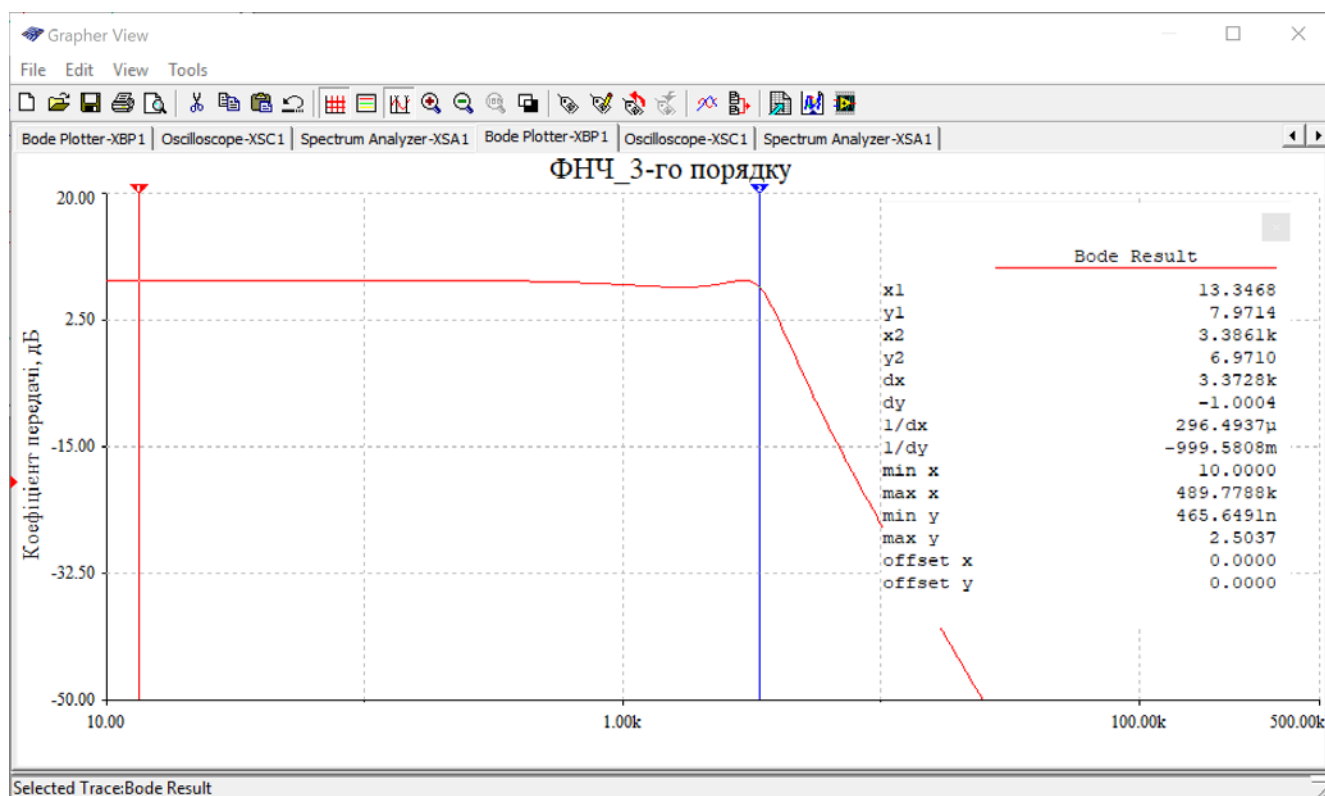


Рис. 3.2. АЧХ фільтру нижніх частот

Для знаходження частоти зрізу у вікні Grapher необхідно включити курсори і розмістити червоний курсор на початку осі X (на горизонтальній ділянці АЧХ), а синій курсор на початку спаду характеристики. Зчитати показання у червоного курсору (на рис. 3.2 це рівень 7,9714 дБ на частоті 13,34 Гц). На другому етапі розмістити курсор миші на синьому курсорі і натиснути

праву кнопку миші. У випадяючому меню (рис. 3.3) обрати пункт **Cet Y_Value =>** і у вікні що відкриться вписати число на 1 дБ менше ніж показання червоного курсору, тобто 6,971 дБ, якщо задана нерівномірність АЧХ 1 дБ (рис. 3.4). Якщо задана інша величина нерівномірності, то слід шукату величину a_c меншу ніж значення y_1 червоного курсору. Результат пошуку частоти наведений на рис. 3.5.

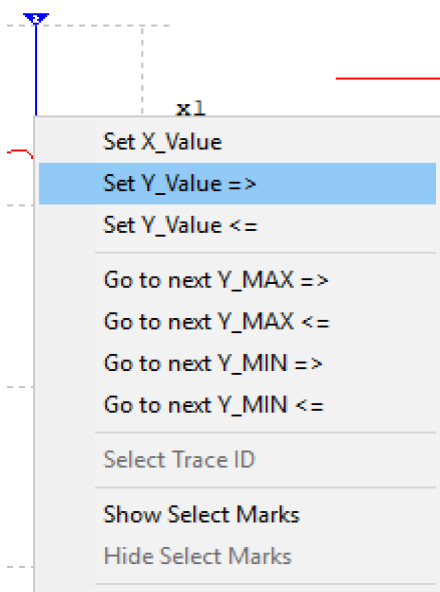


Рис. 3.3. Випадаюче меню курсору



Рис. 3.4. Встановлення рівня для знаходження частоти зрізу

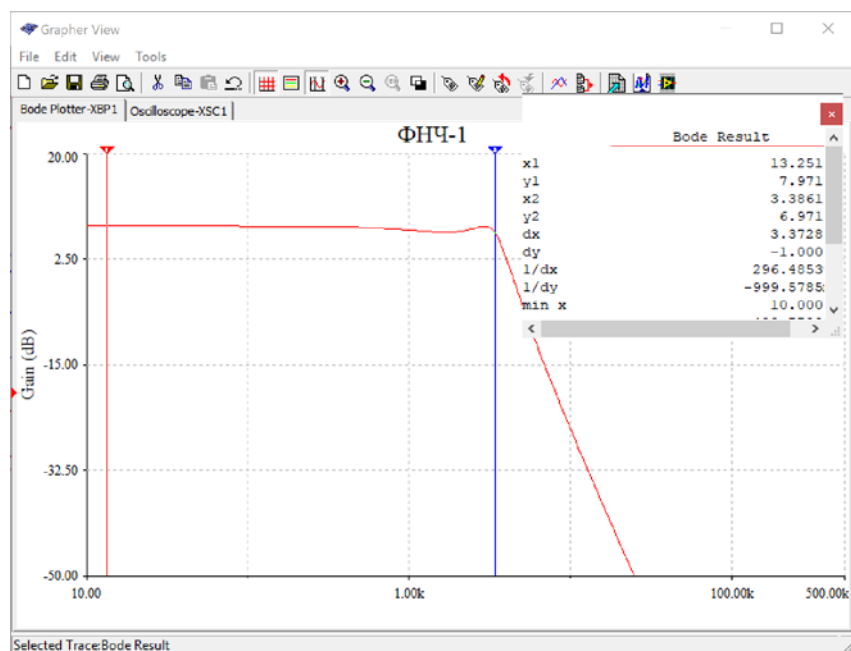


Рис. 3.5. Результат пошуку частоти зрізу фільтру нижніх частот

З рис. 3.5 слідує, що частота зрізу дорівнює 3,386 кГц (показання курсору y2).

Для перевірки нерівномірності АЧХ у смузі пропускання треба знайти мінімальний рівень коефіцієнта передачі. Для цього треба у випадаючому меню першого (червоного) курсора встановити параметр **Go to next Y_Min =>**. Результат пошуку наведений на рис. 3.6.

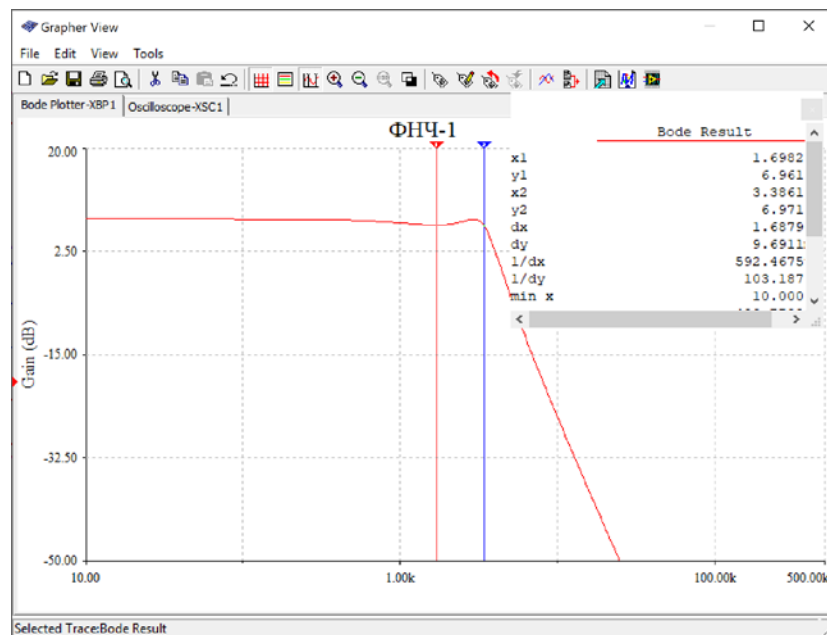


Рис. 3.6. Результат вимірювання мінімального коефіцієнта передачі у смузі пропускання

Порівнюючи значення y1 для частоти 13 Гц та 1,698 Гц (рис. 3.6) можна зробити висновок,

що нерівномірність АЧХ у смузі пропускання складає 1,01 дБ.

Аналогічно знаходженню частоти зрізу знаходиться частота гарантованого згасання. Тобто при пошуку частоти задається рівень, який на величину a_s менше, ніж рівень на горизонтальній ділянці АЧХ. Для прикладу що розглядається потрібно від 7,971 дБ відняти заданий рівень a_s . Наприклад $a_s = 50$ дБ, то треба шукати частоту на якій згасання буде складати $7,971 - 50 = -42,029$. Результат пошуку частоти, на якій згасання складає -42 дБ, наведений на рис. 3.7.

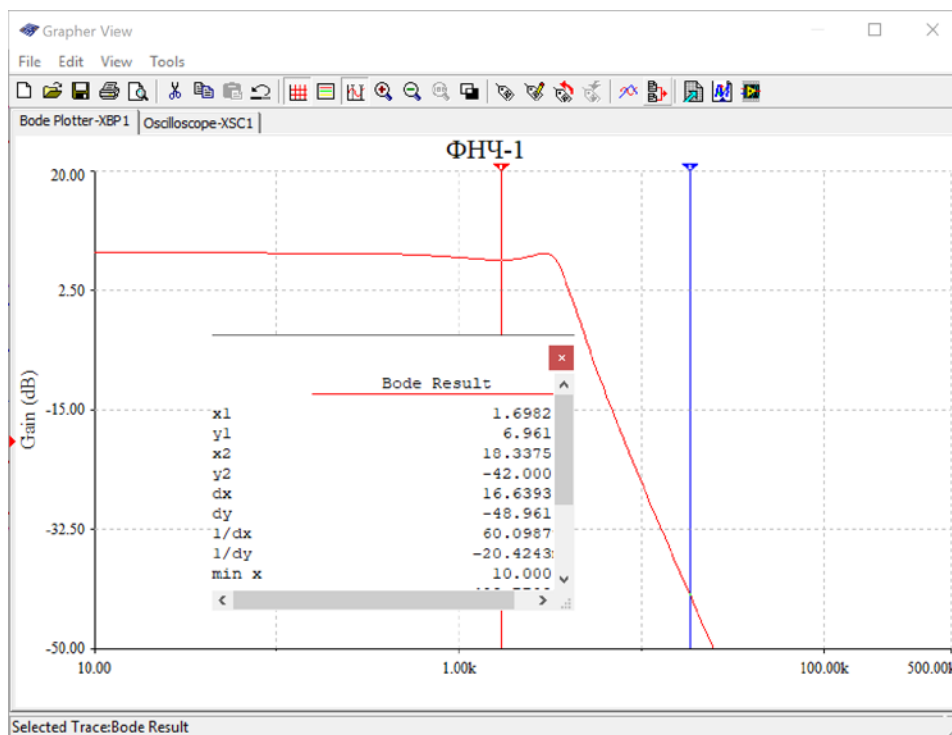


Рис. 3.7. Результат пошуку частоти, на якій згасання складає -42 дБ

З рис. 3.7 слідує, що частота гарантованого згасання 50 дБ дорівнює 18,337 кГц.

3.2 Завдання

Виміряти наступні параметри фільтрів будь-яким способом (обираєте самостійно), моделі фільтрів додаються і наведені на рис. 3.8 і 3.9:

- коефіцієнт підсилення фільтру
- частоту зрізу;
- частоту гарантованого згасання;
- нерівномірність АЧХ у смузі пропускання.

Параметри a_c та a_s задані у таблицях індивідуальних завдань. Для того щоб збільшити кількість варіантів завдання величина a_c буде задана для частоти зрізу (хоча це не зовсім вірно, бо нерівномірність за правилами оцінюється у всьому діапазоні частот смуги пропускання).

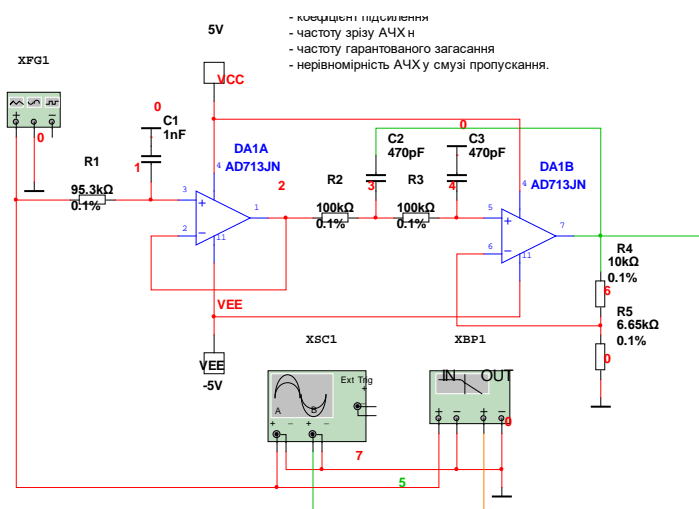
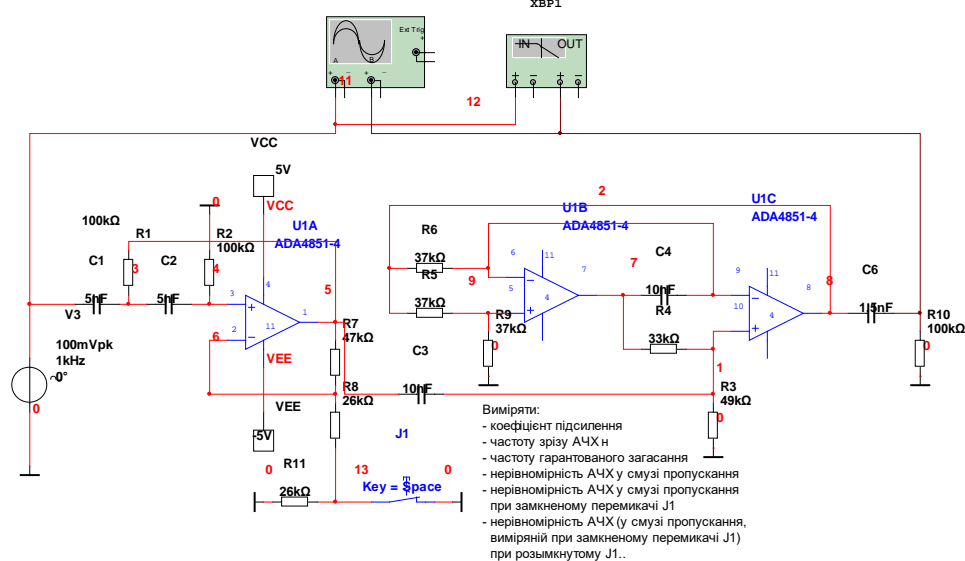


Рис. 3.8. Модель фільтра нижніх частот 3-порядку

Рис. 3.9. Модель фільтра верхніх частот 5-порядку



Для моделі на рис. 3.9 треба провести вимірювання в двох різних положеннях перемикача J1. Перемикається він клавішею Space.

3.3 Звіт про виконання лабораторної роботи

У звіті навести результати вимірювань заданих параметрів окремо для кожного з фільтрів. Результати вимірювання підтвердити скріншотами.

Звіт оформити у текстовому файлі з назвою файлу **Лаб3_Прізвище_група.docx**.

Контрольні запитання

6. Що таке частота зрізу?
7. Що означає термін частота гарантованого затухання?.
8. Як знайти точне значення частоти по заданому затуханню?
9. Як знайти точне значення затуханню по заданому значенні частоти?

Таблиця 3.1. Завдання на лабораторну роботу 3

| № вар. | a_c на частоті зрізу, дБ | a_s , дБ | № вар. | a_c на частоті зрізу, дБ | a_s , дБ |
|--------|-------------------------------|------------|--------|-------------------------------|------------|
| 1. | 0,1 | 30 | 2. | 1,3 | 55 |
| 3. | 0,2 | 35 | 4. | 1,4 | 60 |
| 5. | 0,3 | 40 | 6. | 1,5 | 30 |
| 7. | 0,4 | 45 | 8. | 1,6 | 35 |
| 9. | 0,5 | 50 | 10. | 1,7 | 40 |
| 11. | 0,6 | 55 | 12. | 1,8 | 45 |
| 13. | 0,7 | 60 | 14. | 1,9 | 50 |
| 15. | 0,8 | 30 | 16. | 2,0 | 55 |
| 17. | 0,9 | 35 | 18. | 2,1 | 60 |
| 19. | 1,0 | 40 | 20. | 2,2 | 30 |
| 21. | 1,1 | 45 | 22. | 2,3 | 35 |
| 23. | 1,2 | 50 | 24. | 1,3 | 55 |

Лабораторна робота №4. Вимірювання нелінійних спотворень у Multisim

Мета роботи: ознайомитись з методами вимірювання нелінійних спотворень у програмі Multisim.

4.1 Теоретичні відомості

4.1.1 Поняття про коефіцієнт нелінійних спотворень

Коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу (КНС) або Total Harmonic Distorsions (THD) – показник, що характеризує ступінь відмінності форми сигналу від синусоїдальної, так само можна сказати що це величина для кількісної оцінки нелінійних спотворень синусоїдального сигналу. Інша назва – коефіцієнт гармонік K_r . Він є мірою нелінійних спотворень сигналу простих гармонійних коливань.

Результати вимірів коефіцієнта нелінійних спотворень сигналу більш-менш відповідають суб'єктивному сприйняттю слухом людини до частот приблизно 6 кГц. При більше високих частотах сигналу його гармоніки виходять за межі діапазону слухового сприйняття.

Коефіцієнт K_r безрозмірний, але звичайно множиться на 100% для одержання значення у процентах.

Коефіцієнт нелінійних спотворень K_r сигналу дорівнює відношенню середньоквадратичного значення всіх вищих гармонік сигналу до напруги першої гармоніки:

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}.$$

Існує і інше визначення. **Коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу** – величина для кількісної оцінки нелінійних спотворень сигналу, рівна відношенню середньоквадратичної суми всіх вищих спектральних компонентів сигналу, до середньоквадратичної суми спектральних компонентів усього сигналу (крім постійної складової). Іноді використовується нестандартизований синонім – клірфактор. За цим визначенням K_e описується формулою:

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}.$$

У англomовній літературі коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу позначається як **THD** (Total Harmonic Distortion).

4.1.2 Вимірювання коефіцієнта гармонік у Multisim

Вимірювання за допомогою Фур'є аналізу

При виконанні Фур'є-аналізу автоматично розраховується коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу. Треба пам'ятати, що **для вимірювання нелінійних спотворень на вхід пристрою необхідно подавати синусоїдальний сигнал.**

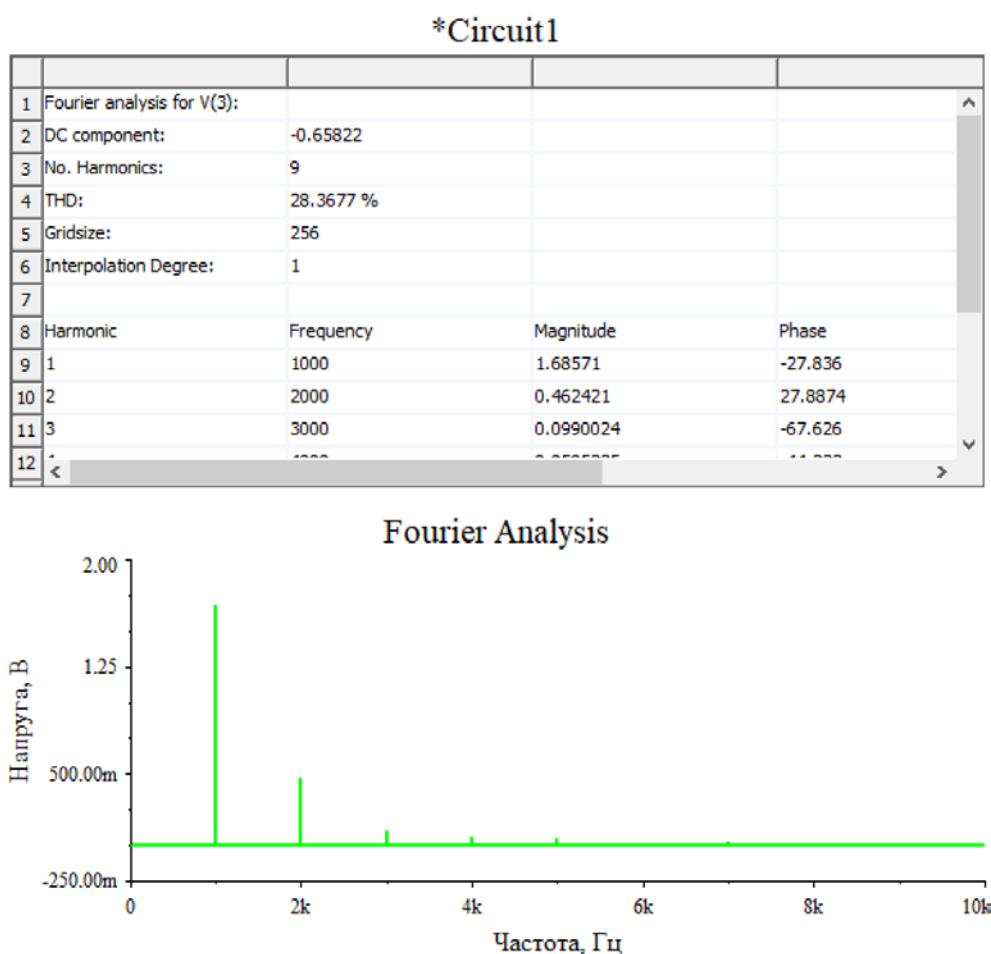


Рис. 4.1. Результат аналізу Фур'є сигналу з нелінійними спотвореннями

З рис. 4.1 слідує, що коефіцієнт нелінійних спотворень досліджуваного пристрою дорівнює 28,36%.

Для звукотехнічної апаратури різного класу коефіцієнт нелінійних спотворень лежить від 0.001% (для найкращих зразків) до 3% – для пристроїв низького класу якості.

лінійної ділянки амплітудної характеристики. Чим вища напруга живлення, тим більша довжина лінійної ділянки амплітудної характеристики.

Можна провести експерименти і змінюючи напругу вхідного сигналу. Чим більше амплітуда вхідного сигналу, тим більше значення буде приймати K_T (це явище теж пов'язане з лінійністю амплітудної характеристики).

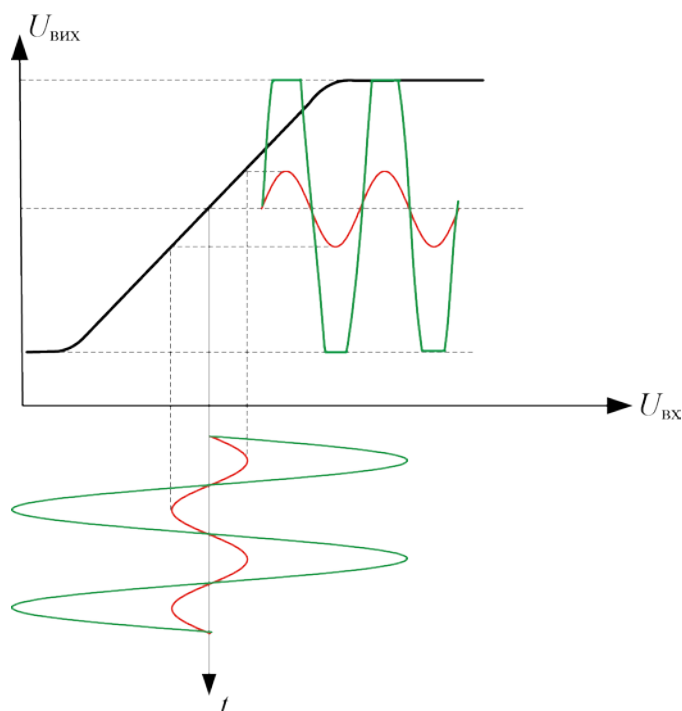


Рис. 4.4. Амплітудна характеристика підсилювача

На рис. 4.4 наведена амплітудна характеристика підсилювача – це залежність вихідної напруги підсилювача від напруги на його вході. Якщо на вхід подається сигнал малої амплітуди (червоного кольору) і його значення не виходить за межі лінійної ділянки, то вихідний сигнал має таку ж форму як і вхідний. При збільшенні вхідної напруги (зеленого кольору) сигнал виходить за межі лінійної ділянки і вихідний сигнал обмежується, що призводить до появи значних нелінійних спотворень.

4.1.3. Вимірювання коефіцієнта нелінійних спотворень за допомогою Distortion Analyzer

У Multisim для вимірювання K_T передбачений пристрій Distortion Analyzer, який дозволяє вимірювати не тільки THD, але і SINAD (Signal-to-Noise And Distortion Ratio) – динамічний діапазон вільний від шумів та спотворень. Вимірюється у дБ. На рис. 4.5 наведені результат вимірювання K_T за допомогою Distortion Analyzer. Результат практично співпадає з результатами

обчислення за допомогою Фур'є-аналізу.

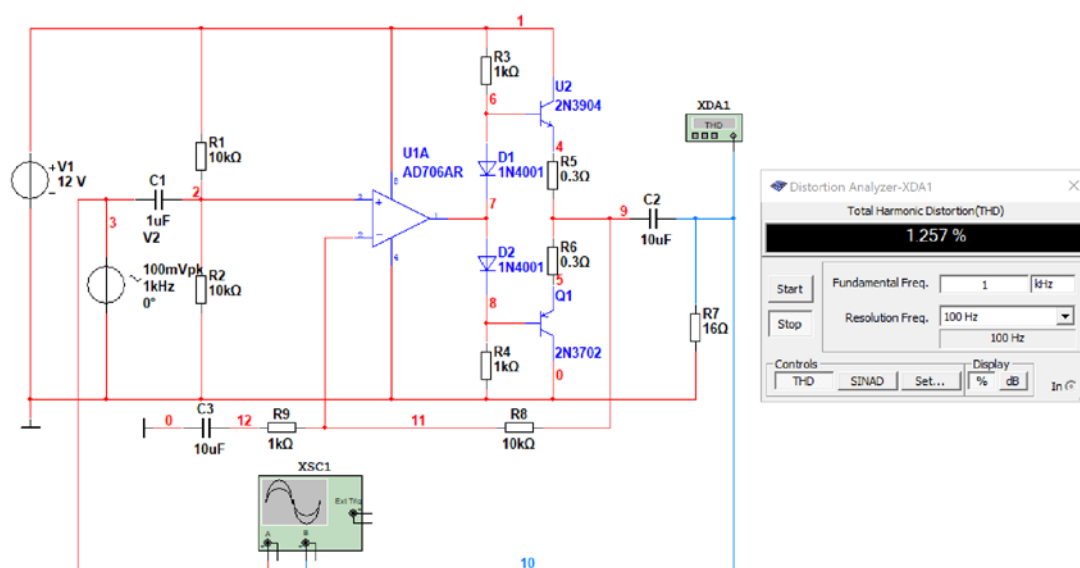


Рис. 4.5. Модель підсилювача та результат вимірювання K_T за допомогою Distortion Analyzer

Вимірювання K_T можна здійснювати як у процентах так і у дБ. При натисканні кнопки Set відкривається вікно налаштувань (рис. 4.6), у якому можна задати кількість гармонік для Фур'є-аналізу і кількість точок усереднення результатів вимірювання (по аналогії з аналізатором спектру).

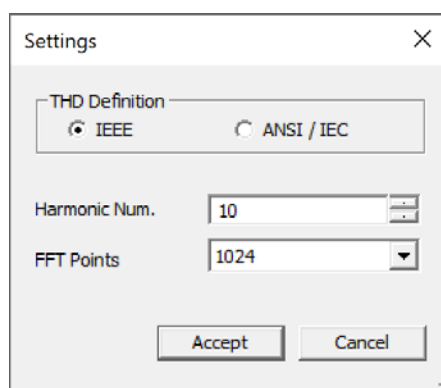


Рис. 4.6. Вікно налаштувань Distortion Analyzer

4.2 Завдання на роботу

1. Виміряти коефіцієнт гармонік на виходах підсилювачів U1A та у точці 9 (використовуючи модель "Вимірювання коефіцієнта гармонік.ms10", що наведена на рис. 4.7) при двох значеннях напруги на вході – 100 мВ та 300 мВ. Вимірювання здійснювати шляхом Фур'є-аналізу. Контроль здійснювати за допомогою Distortion Analyzer.

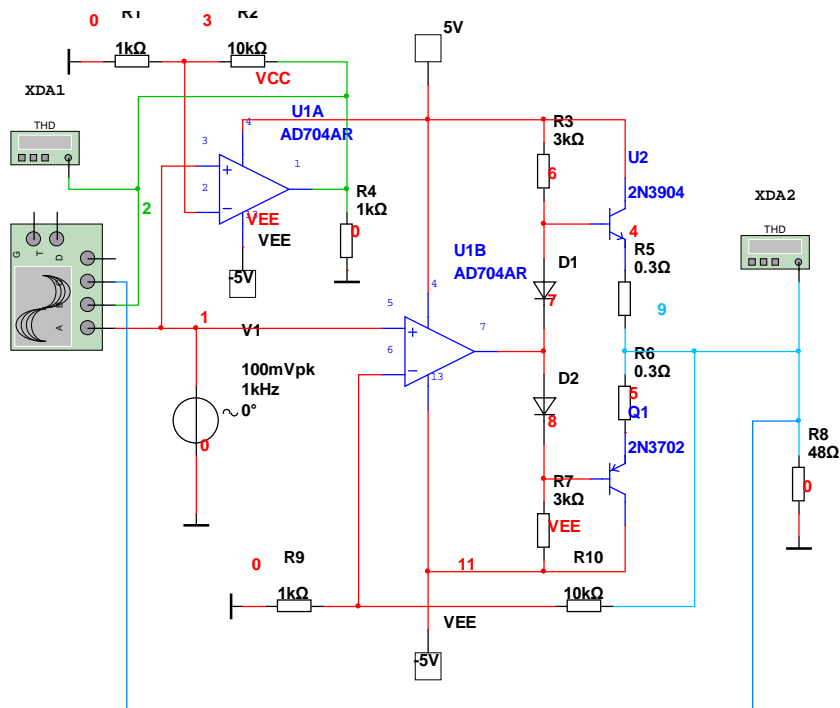


Рис. 4.7. Модель для вимірювання коефіцієнта гармонік

Записати виміряні значення і порівняти їх між собою. Навести осцилограми сигналів для кожного з вимірювань. Поясніть чому відрізняються виміряні значення K_T при різних значеннях вхідної напруги.

2. Виміряти K_T у точці 9 при трьох значеннях опору навантаження R_8 – 48 Ом (у першому досліді), 32 та 16 Ом. Навести осцилограми сигналів та результати вимірювання (аналогічно першому пункту).

4.3 Звіт про виконання лабораторної роботи

У звіті навести результати вимірювань K_T зі скріншотами результатів вимірювання. Під кожним рисунком обов'язково зробити пояснюючий підпис, що містить умови і результат. Наприклад,

Рис. 2. Результат вимірювання спектру і K_T на виході підсилювача U1A
при вхідній напрузі 100 мВ

Зробити висновки з результатів вимірювання при різних значеннях напруги на вході і окремо для різних значень опору навантаження.

Відповісти на контрольні питання.

Звіт оформити у текстовому файлі з назвою файлу **Лаб4_Прізвище_група.docx**.

Контрольні запитання

Для відповіді на контрольні питання ознайомтесь з текстом лекції №8.

1. В чому різниця між лінійним та нелінійними спотвореннями?
2. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача лінійна в заданому діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц. Чи вносить такий підсилювач лінійні спотворення?
3. Якщо фазові спектри сигналу на вході і виході підсилювача відрізняються, а амплітудні співпадають, то вносить такий підсилювач спотворення? Якщо вносить, то які?
4. Чи залежить ширина спектру від відношення тривалості імпульсу до періоду слідування прямокутних імпульсів?
5. Як обрати кількість гармонік для аналізу спектру якщо задана точність з якою необхідно виміряти рівень найменшої гармоніки?

Лабораторна робота №5. Вплив положення робочої точки підсилювачів звукової частоти на їх параметри

Мета роботи: ознайомитись з методами оптимізації параметрів підсилювачів звукової частоти з точки зору мінімізації нелінійних спотворень.

5.1 Теоретичні відомості

Якщо живлення пристрою здійснюється від двох джерел напруги різної полярності, то в залежності від конфігурації схеми амплітудні характеристики можуть приймати різний вигляд. На рис. 5.1 наведені приклади амплітудних характеристик пристроїв при використанні двополярної напруги.

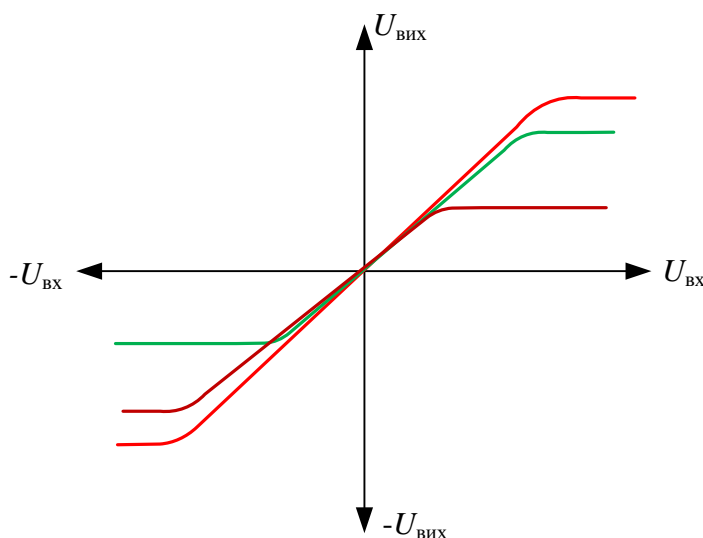


Рис. 5.1. Приклади амплітудних характеристик пристроїв при двополярній напрузі живлення

З рис. 5.1 витікає, що характеристика може бути не тільки симетричною, але і несиметричною. Для вибору робочої точки слід керуватися доволі простими правилами. Якщо потрібно забезпечити максимальну амплітуду сигналу на виході пристрою при мінімальних нелінійних спотвореннях, то необхідно вибрати робочу точку посередині лінійної ділянки амплітудної характеристики.

На рис. 5.1 для червоної амплітудної характеристики (симетричної відносно осей) напруга робочої точки дорівнює 0 В, для зеленої – це буде позитивна напруга, для фіолетової – від'ємна напруга.

Розрахувати положення робочої точки можна за формулою:

$$U_{зм} = (U_{+max} - |U_{-max}|)/2,$$

де U_{+max} – максимальна позитивна напруга на виході пристрою, U_{-max} – максимальна негативна напруга на виході пристрою.

Наприклад, при $U_{+max} = 15$ В і $U_{-max} = -15$ В напруга $U_{зм} = 0$. Якщо $U_{+max} = 15$ В а напруга $U_{-max} = -7$ В, то $U_{зм} = (15 - 7)/2 = 4$ В.

Що можна вважати критерієм меж лінійної ділянки амплітудної характеристик. Це така амплітуда сигналу на вході пристрою при якій нелінійні спотворення не перевищують обумовленим технічними характеристиками пристрою. Наприклад, для підсилювачів потужності звукової частоти існують такі параметри як нелінійні спотворення при заданій вихідній потужності. Цей критерій і буде зумовлювати межі лінійної ділянки.

Якщо критерій границі лінійної ділянки не заданий, то його можна встановити виходячи з призначення пристрою. Наприклад, для підсилювача звукової частоти дуже важливо щоб коефіцієнт нелінійних спотворень не змінювався, або змінювався в невеликих межах, в усьому діапазоні зміни вхідної напруги. Тоді критерієм може бути зростання K_T (наприклад у 2 рази).

Розглянемо на прикладі вимірювання напруги робочої точки та оцінки меж лінійної ділянки амплітудної характеристики. На рис. 5.2 наведена модель для вимірювання амплітудної характеристики і оцінки нелінійних спотворень підсилювача потужності.

Для вимірювання амплітудної характеристики на вхід підсилювача доцільно подавати трикутний сигнал (хоча це і не обов'язково), а для вимірювання K_T – обов'язково синусоїдальний. При вимірюванні потрібно зачекати завершення перехідних процесів. Коли напруга, що показує вольтметр U_3 , перестане змінюватись, можна починати вимірювання.

При симетричній двополярній напрузі живлення ± 6 В, ширина амплітудної характеристики на рис. 5.2 дорівнює 5,49 В (значення розмаху напруги у каналі В осцилографа).

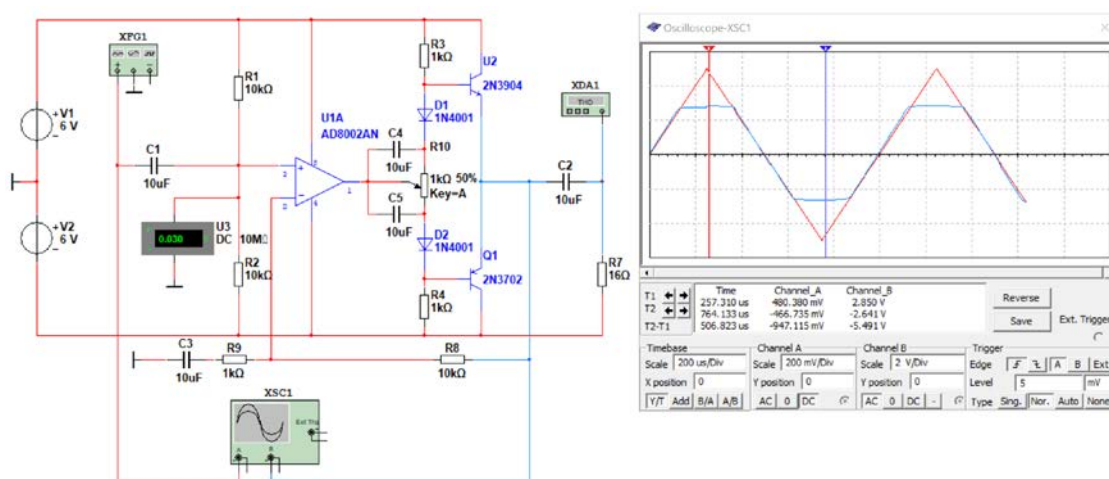


Рис. 5.2. Модель підсилювача з симетричною двополярною напругою живлення

Коефіцієнт підсилення такого підсилювача дорівнює $K_u = 1 + R_8/R_9 = 11$.

Проведемо вимірювання K_T при двох значеннях амплітуди сигналу на виході – 1 і 2,4 В, що на 0,24 В менше ніж максимальне значення напруги амплітудної характеристики. Для цього на вхід подаємо напругу $U_{BX1} = U_{ВНХ1}/11 \text{ В} = 1/11 \approx 91 \text{ мВ}$, а $U_{BX2} \approx 218 \text{ мВ}$.

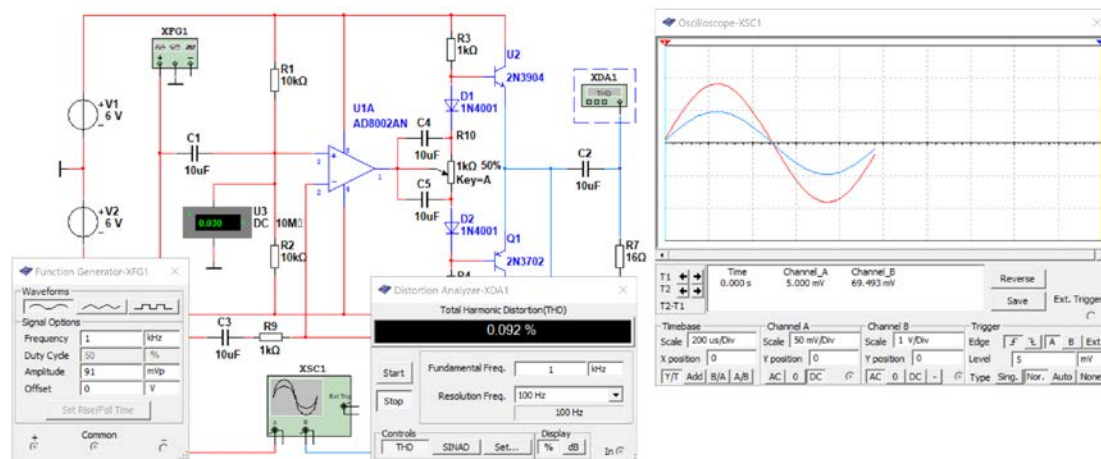


Рис. 5.3. Результат вимірювання K_T підсилювача з симетричною двополярною напругою живлення при $U_{BX1} = 91 \text{ мВ}$

При $U_{BX1} = 91 \text{ мВ}$ коефіцієнт нелінійних спотворень дорівнює 0,092% (відношення SINAD = 60,75 дБ), а при $U_{BX2} = 218 \text{ мВ}$ – 0,707% (відношення SINAD = 42,98 дБ). Результати вимірювання K_T продемонстрували, що при вихідній напрузі 2,4 В підсилювач працює на нелінійній ділянці характеристики, бо K_T при такій напрузі у 7,5 разів більше ніж при напрузі 1 В на виході.

При однополярній напрузі живлення напруга робочої точки знаходиться аналогічно (дивись лекцію 10).

5.2 Завдання на роботу

3. Встановити параметри елементів моделі, наведеної на рис. 5.4 у відповідності з варіантами завдання, наведених у табл. 5.2.
4. Виміряти амплітудну характеристику підсилювача аналогічно наведеному в теоретичній частині прикладі.
5. Розрахувати положення робочої точки підсилювача і встановити напругу зміщення $U_{зм}$ на вході 3 підсилювача U2A за допомогою потенціометра R3.

6. Виміряти коефіцієнт нелінійних спотворень (K_{Γ}) при встановленому значенні напруги зміщення.
7. Виміряти K_{Γ} при значеннях напруги зміщення $U_{3M} \pm \Delta U_{3M}$, де ΔU_{3M} відхилення напруги зміщення від розрахованого значення. Результати вимірювання занести в табл. 5.1. Замість записів $U_{3M} + \Delta U_{3M}$ у таблиці записати значення встановленої напруги.
8. Побудувати графік залежності K_{Γ} від напруги зміщення.

Таблиця 5.1. Результати вимірювання нелінійних спотворень

| | | | | | | |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| $U_{3M}, \text{В}$ | $U_{3M} + 0,3U_{3M}$ | $U_{3M} + 0,2U_{3M}$ | $U_{3M} + 0,1U_{3M}$ | $U_{3M} + 0,05U_{3M}$ | $U_{3M} + 0,02U_{3M}$ | U_{3M} |
| $K_{\Gamma}, \%$ | | | | | | |
| $U_{3M}, \text{В}$ | $U_{3M} - 0,3U_{3M}$ | $U_{3M} - 0,2U_{3M}$ | $U_{3M} - 0,1U_{3M}$ | $U_{3M} - 0,05U_{3M}$ | $U_{3M} - 0,02U_{3M}$ | U_{3M} |
| $K_{\Gamma}, \%$ | | | | | | |

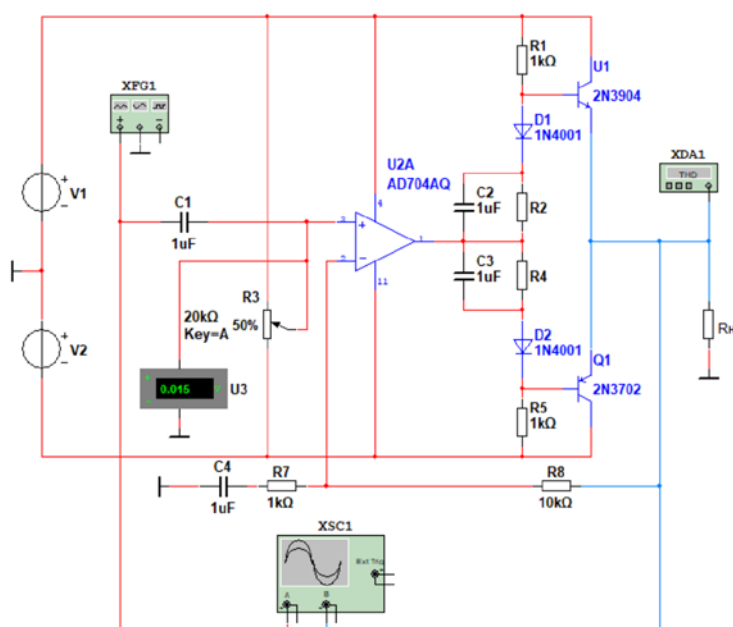


Рис. 5.4. Модель підсилювача для дослідження

5.3 Звіт про виконання лабораторної роботи

У звіті навести:

1. Завдання на виконання лабораторної роботи і схему моделі з встановленими для вашого варіанту завдання параметрами.
2. Результати вимірювання K_{Γ} при розрахованому значенні U_{3M} . Навести скріншот з результатами вимірювання для цього значення (аналогічно рис. 5.3). Під кожним рисунком обов'язково зробити пояснюючий підпис, що містить умови і результат. Наприклад,

Рис. 5.1. Результат вимірювання амплітудної характеристики підсилювача

Рис. 5.2. Результат вимірювання K_T підсилювача при напрузі зміщення $U_{зм} = xx$ В

3. Таблицю з результатами вимірювань K_T .
4. Побудувати графік залежності $K_T = f(U_{зм})$.
5. Зробити висновки з результатів вимірювання при різних значеннях напруги зміщення.
6. Відповісти на контрольні питання.

Звіт оформити у текстовому файлі з назвою файлу **Лаб5_Прізвище_група.docx**.

Окрім звіту надіслати модель з встановленими для вашого варіанту параметрами і назвою **Лаб5_Прізвище_група.ms10**.

Контрольні запитання

Для відповіді на контрольні питання ознайомтесь з текстом лекції №10.

6. Як розрахувати положення робочої точки по амплітудній характеристиці?
7. Чи залежить K_T від положення робочої точки? Якщо так, то чому?
8. Чи залежить K_T від опору навантаження? Для відповіді на це питання проведіть експеримент, вимірявши K_T при двох різних значеннях опору навантаження.
9. Як вимірюючи K_T можна знайти напругу зміщення?

Таблиця 5.2. Завдання на лабораторну роботу 5

| № варіанту | $R_2 = R_4$, Ом | R_H , Ом | Напруга $V_1 = V_2$, В | № варіанту | $R_2 = R_4$, Ом | R_H , Ом | Напруга $V_1 = V_2$, В |
|------------|------------------|------------|-------------------------|------------|------------------|------------|-------------------------|
| 1. | 30 | 32 | 18 | 2. | 91 | 10 | 6 |
| 3. | 33 | 30 | 17 | 4. | 100 | 9,1 | 5 |
| 5. | 36 | 27 | 16 | 6. | 110 | 8 | 4 |
| 7. | 39 | 24 | 15 | 8. | 120 | 7 | 18 |
| 9. | 42 | 21 | 14 | 10. | 130 | 6 | 17 |
| 11. | 47 | 20 | 13 | 12. | 150 | 5 | 16 |
| 13. | 51 | 18 | 12 | 14. | 160 | 4 | 15 |
| 15. | 56 | 16 | 11 | 16. | 180 | 6 | 14 |
| 17. | 62 | 15 | 10 | 18. | 200 | 8 | 13 |
| 19. | 68 | 13 | 9 | 20. | 210 | 10 | 12 |
| 21. | 75 | 12 | 8 | 22. | 240 | 12 | 11 |
| 23. | 82 | 11 | 7 | 24. | 91 | 10 | 6 |

Лабораторна робота №6. Аналіз перехідних процесів

Мета роботи: ознайомитись з методами аналізу та налаштуванням параметрів при аналізі перехідних процесів.

6.1 Теоретичні відомості

Що відбувається на виході коливального контуру або будь якого іншого кола при його підключенні до джерела сигналів? Як довго триває перехідний процес, чи залежить він від параметрів контуру (частоти резонансу, добротності) і які параметри вихідного сигналу дозволяє дізнатися інструмент аналізу Transient Analysis (аналіз перехідних процесів).

Використаємо для аналізу вже неодноразово розглянуту модель коливальних контурів, що наведена на рис. 6.1.

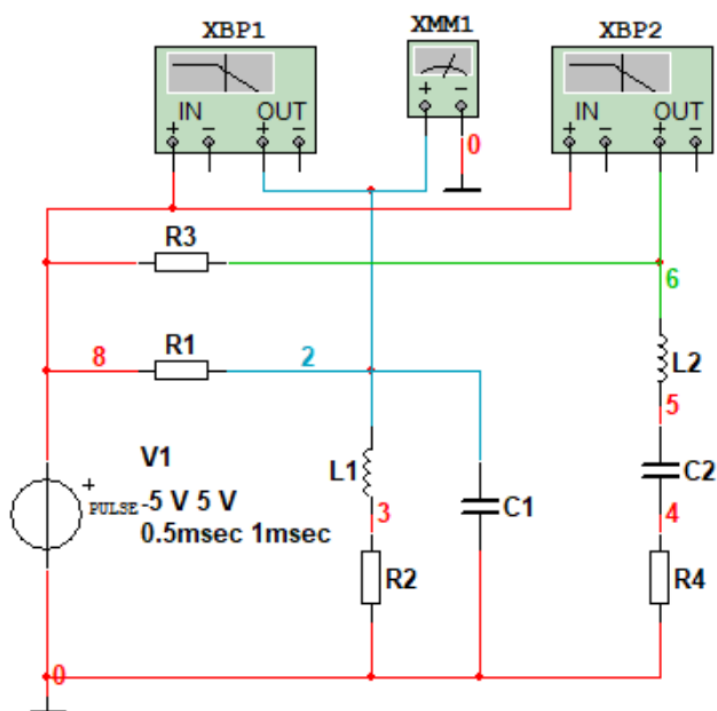


Рис. 6.1. Модель паралельного та послідовного контурів

Для аналізу перехідних процесів на вхід контурів треба подавати сигнали прямокутної форми (двополярні або однополярні імпульси). Якщо на вхід подати гармонічний сигнал, то на виході буде також формуватися аналогічний сигнал і перехідного процесу ми не побачимо.

Для того щоб початок перехідного процесу не співпадав з початком координат введемо затримку початку формування сигналу на 0,1 мс, як показано на рис. 6.2. Тривалість періоду та

імпульсів залежать від параметрів кіл які досліджуються і від того для чого призначені кола. Амплітуда вхідного сигналу для аналізу пасивних кіл не має значення окрім випадків коли у схемах використовуються нелінійні елементи (з нелінійною амплітудною характеристикою).

Оскільки ми досліджуємо найпростіші кола з лінійними характеристиками, то амплітуда значення не має і її можна задавати довільно. На рис. 6.2 амплітуда імпульсів дорівнює ± 5 В.

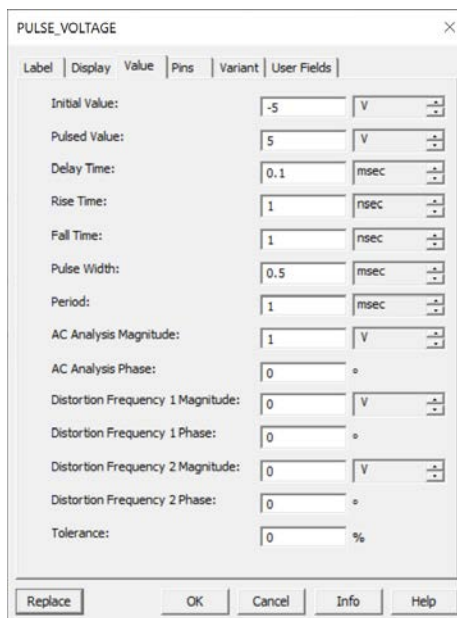


Рис. 6.2. Налаштування генератора імпульсів для виконання аналізу перехідних процесів

Для здійснення аналізу у меню Simulate обираємо пункт Analyses/Transient Analysis, як показано на рис. 23.3.

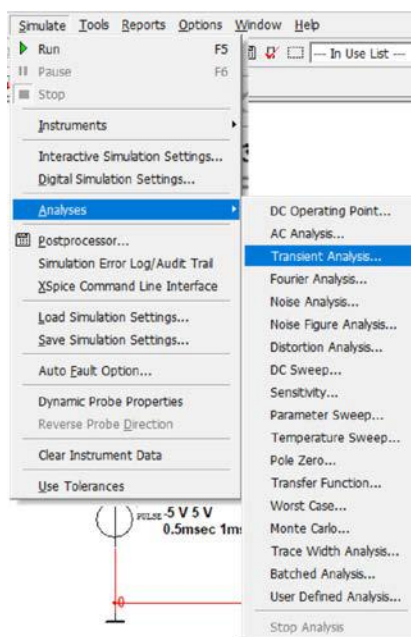


Рис. 6.3. Вибір аналізу перехідних процесів

У вікні що відкривається (рис. 6.4) задаємо час аналізу якщо необхідно. По замовчування цей час дорівнює 1 мс. А оскільки тривалість періоду сигналу на вході задано рівним 1 мс, то час аналізу можна залишити без зміни. Якщо збільшити час аналізу, то ми побачимо декілька перехідних процесів у вікні Grapher. Але тривалість аналізу не повинна бути меншою від періоду вхідного сигналу.

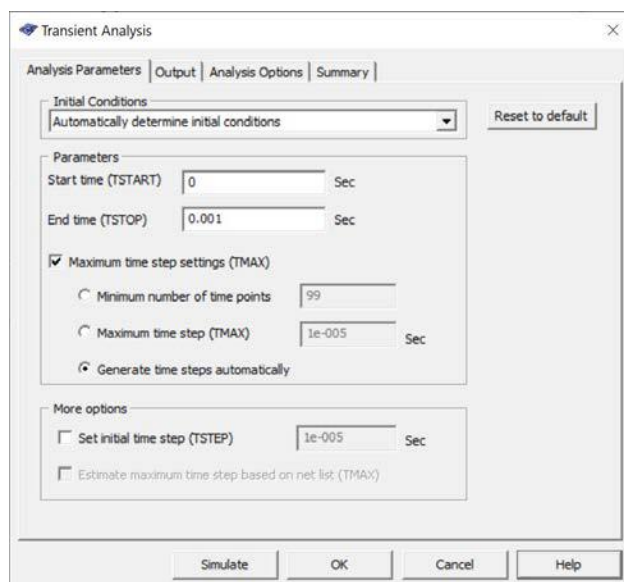


Рис. 6.4. Вікно налаштування Transient Analysis

Найзручніше використовувати автоматичний режим встановлення параметрів аналізу. Але можна обрати і інші параметри аналізу (рис. 6.5).

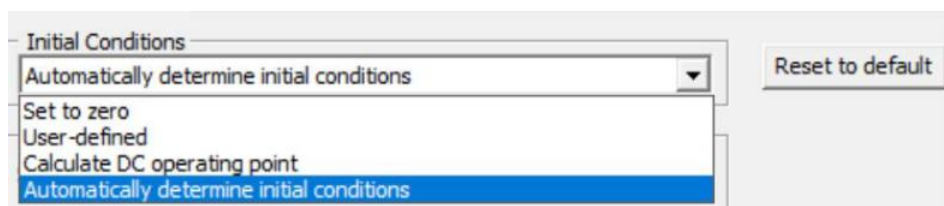


Рис. 6.5. Варіанти встановлення параметрів аналізу перехідних процесів

При необхідності можна збільшити кількість точок аналізу. Для цього потрібно відмітити пункт **Minimum number of time points** і вписати потрібне число. Це необхідно зробити коли аналізуються перехідні процеси високочастотних пристроїв. Оскільки для аналізу використовуються доволі низькочастотні пристрої, то змінювати нічого не потрібно. Потрібно збільшувати кількість точок аналізу, чи не потрібно видно з результатів аналізу. Якщо відображувані криві ламані, то треба збільшити кількість точок аналізу.

Після вибору параметрів аналізу необхідно на вкладці Output задати точку аналізу. Для паралельного контуру це точка V(2), як показано на рис. 6.6.

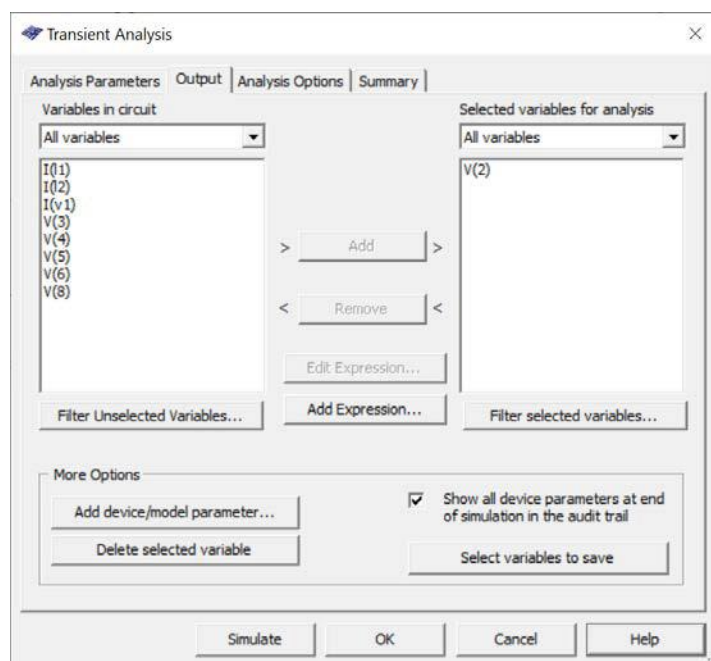


Рис. 6.6. Вибір точки аналізу перехідних процесів у паралельному коливальному контурі

Після вибору точки аналізу треба натиснути кнопку Simulate. Результат аналізу перехідних процесів у паралельному коливальному контурі наведені на рис. 6.7.



Рис. 6.7. Результат аналізу перехідних процесів у паралельному коливальному контурі

У такому масштабі переглядати результати аналізу незручно. Тому треба збільшити масштаб по горизонталі, як показано на рис. 6.8. Включивши курсори можна виміряти тривалість перехідного процесу. На рис. 6.8 тривалість перехідного процесу складає 5 мкс (різниця показань x2 та x1).

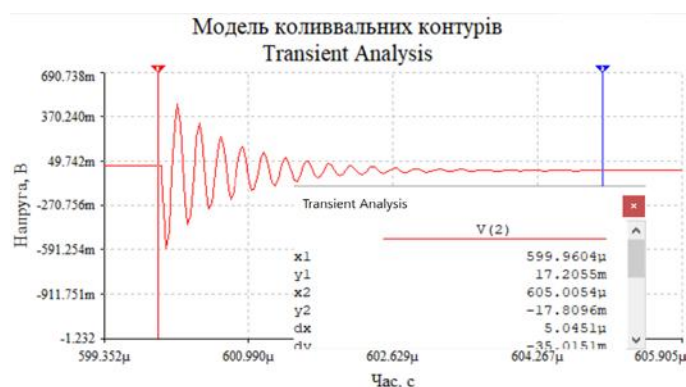


Рис. 6.8. Результати аналізу перехідних процесів у паралельному коливальному контурі при опорі $R_2 = 10 \text{ Ом}$ (у збільшеному масштабі)

Чи зміниться тривалість перехідних процесів якщо змінити опір резистора R_2 (рис. 6.1). Проведемо 2 експерименти. В одному з них опір резистора зменшимо, а в другому збільшимо. Результати наведені на рис. 6.8 отримані при опорі резистора $R_2 = 10 \text{ Ом}$.

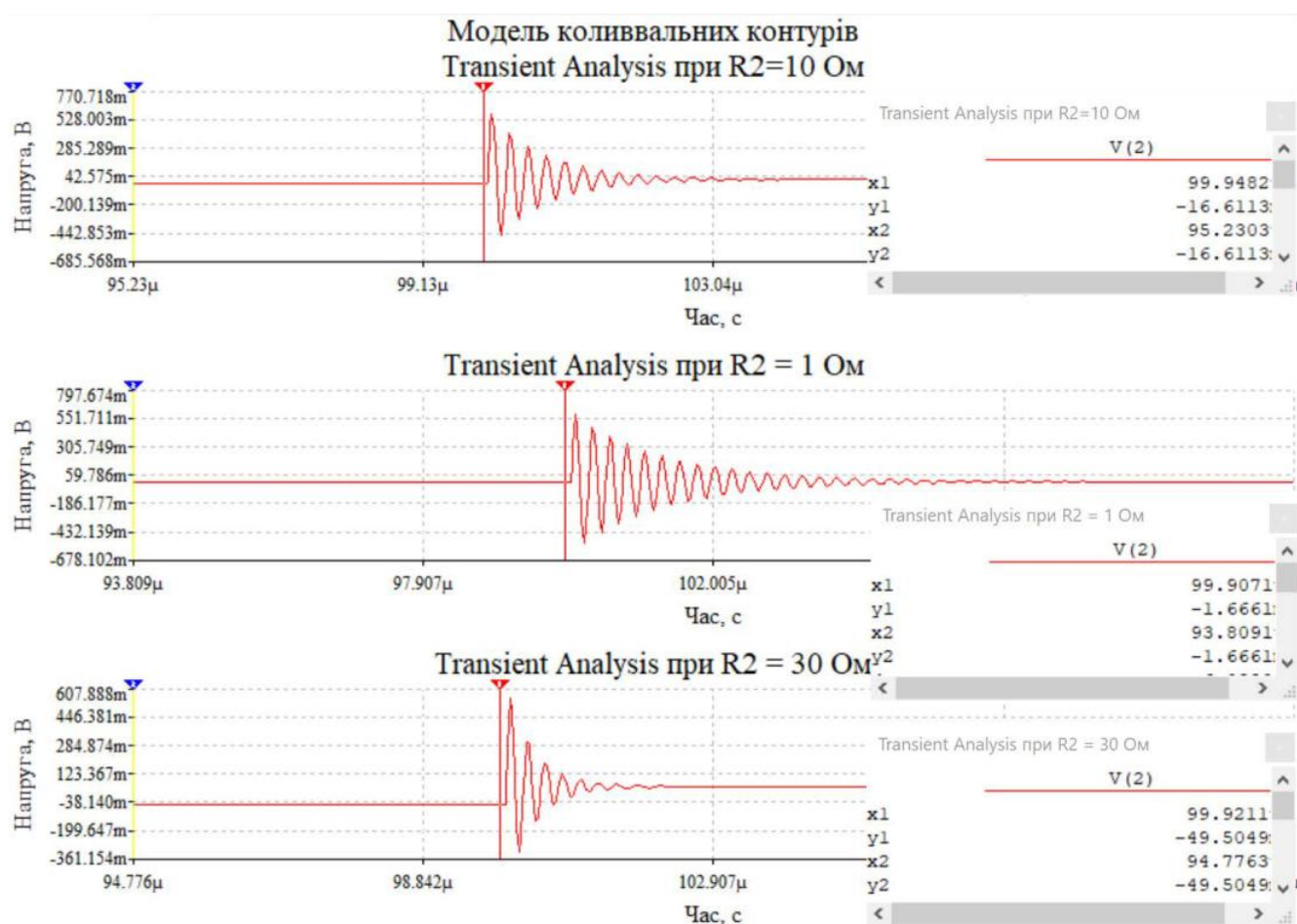


Рис. 6.9. Результати аналізу перехідних процесів у паралельному коливальному контурі при зміні опорі резистора R_2

Як слідує з рис. 6.9 при збільшенні опору резистора R2 тривалість перехідного процесу зменшується. Це пояснюється зменшенням добротності контуру, тобто втрати у контурі зростають і тому енергія в контурі втрачається швидше.

На рис. 6.10 наведена схема моделі фільтра нижніх частот і його АЧХ.

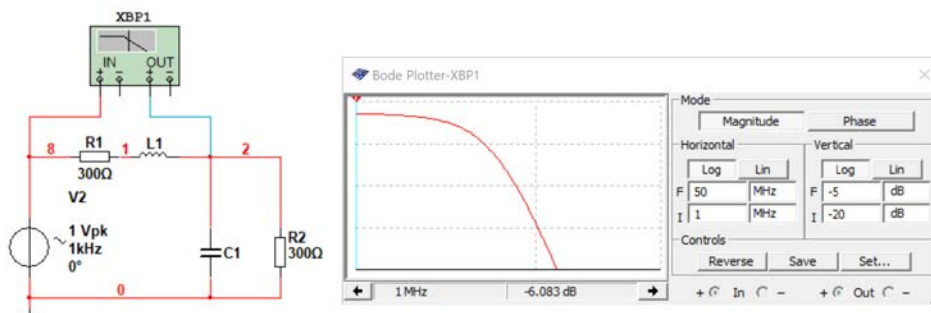


Рис. 6.10. Модель фільтра нижніх частот і його АЧХ

Для аналізу перехідних процесів треба замінити генератор синусоїдального сигналу на генератор імпульсів. Результат аналізу перехідних процесів такого фільтра нижніх частот наведений на рис. 6.11.

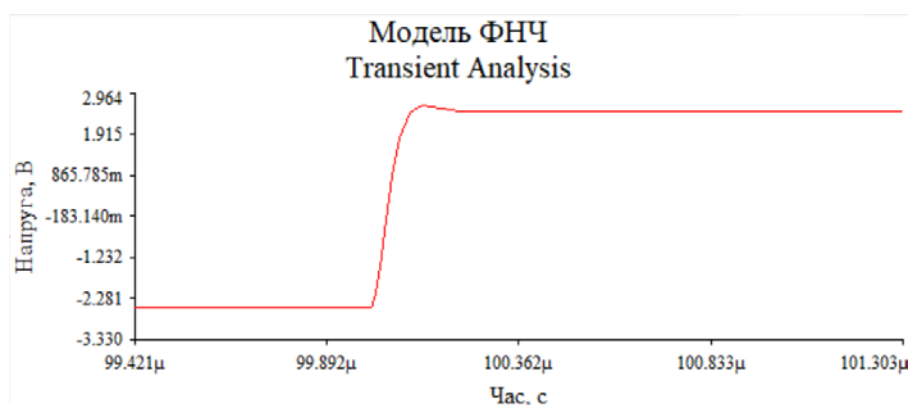


Рис. 6.11. Результат аналізу перехідних процесів фільтра нижніх частот, наведеного на рис. 6.10

Якщо фільтр має велику нерівномірність АЧХ у смузі пропускання, то його перехідний процес буде значно більш тривалим. На рис. 6.12 наведена модель ФНЧ з нерівномірністю АЧХ 2,5 дБ, а перехідні процеси такого фільтра – на рис. 6.13.

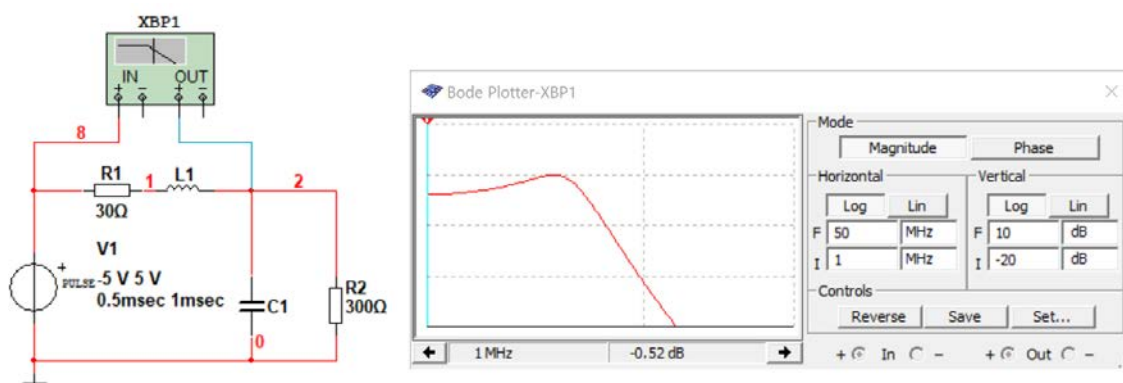


Рис. 6.6. Модель фільтра нижніх частот з нерівномірністю АЧХ у смузі пропускання 2,5 дБ

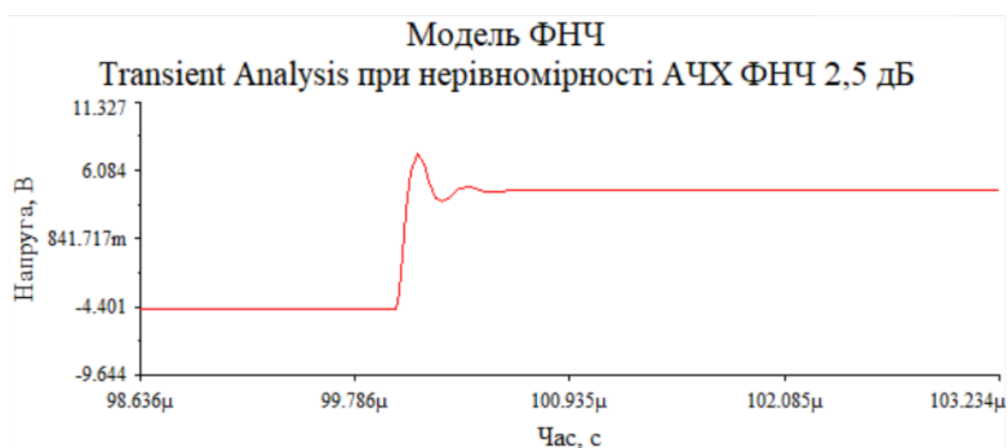


Рис. 6.13. Результат аналізу перехідних процесів ФНЧ з нерівномірністю АЧХ 2,5 дБ

Співставляючи результати аналізу перехідних процесів для ФНЧ з різною нерівномірністю АЧХ, можна зробити висновок, що у фільтрів з викидом АЧХ вище значення коефіцієнта передачі на нижній частоті робочого діапазону, тривалість перехідного процесу збільшується. Це легко перевірити. Змінивши опір резистора R2 з 300 Ом до 3 кОм. Результати вимірювання АЧХ та перехідного процесу наведені на рис. 6.14 і підтверджують це припущення.

А чому з'являється викид АЧХ? Ємність і індуктивність фільтру не змінювались. Змінювався опір резисторів R1 та R2. Коли опір джерела сигналу і опір навантаження узгоджені з хвильовим опором контуру, то викид у АЧХ відсутній. Хвильовий опір фільтру розраховується за співвідношенням $\rho = \sqrt{L/C}$.

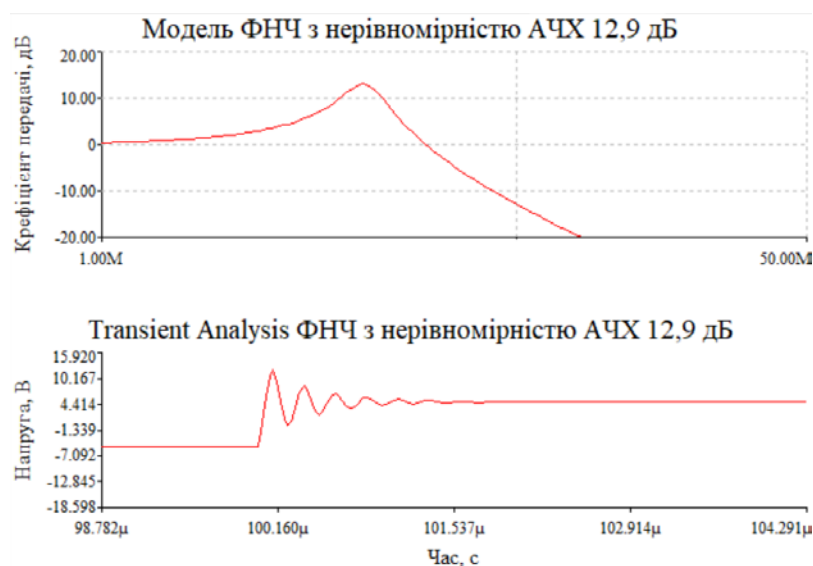


Рис. 6.14. Результати вимірювання АЧХ та перехідного процесу ФНЧ з нерівномірністю АЧХ 12,9 дБ

Отже аналіз перехідного процесу дозволяє з'ясувати як буде реагувати коло чи пристрій на різку зміну вхідної напруги. В ідеальних пристроях форма імпульсного сигналу на вході та виході співпадають. Чи існують такі кола? Близьким до ідеалу є дільник напруги з резисторів. Це легко перевірити провівши аналіз перехідних процесів у такому колі. Амплітуда сигналу на виході дільника буде меншою, а перехідний процес буде відсутній.

6.2 Завдання на роботу

9. Встановити параметри елементів моделі, наведеної на рис. 6.1 у відповідності з варіантами завдання, наведених у табл. 6.1 та 6.2. Провести аналіз перехідних процесів у паралельному коливальному контурі при трьох значеннях опору резистора R_2 : для значення встановленого у таблиці параметрів, і для значень $0,1R_2$ і $10R_2$.

На графіках перехідного процесу (білий фон на графіку) показати його тривалість за допомогою курсорів.

10. Провести аналіз перехідного процесу моделі, наведеної на рис. 6.15. Модель додається. Для чого **спочатку виміряти АЧХ**, а потім підключити необхідні пристрої для аналізу перехідних процесів. Перевірити за допомогою осцилографа, що підсилювач працює на лінійній ділянці амплітудної характеристики (відсутні обмеження сигналу зверху та знизу). Скорегувати амплітуду вхідного сигналу за необхідності. Навести АЧХ та графік перехідного процесу (на світлому фоні).

11. Відповісти на контрольні питання.

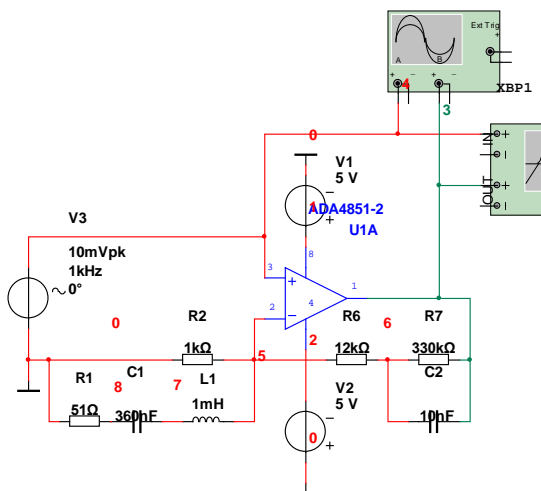


Рис. 6.15. Модель підсилювача для дослідження

6.3 Звіт про виконання лабораторної роботи

У звіті навести:

7. Завдання на виконання лабораторної роботи і схему моделі з встановленими для вашого варіанту завдання параметрами.
8. Результати аналізу перехідних процесів та АЧХ навести у вигляді скріншотів. На кожному скріншоті за допомогою кursorів відмітити початок і закінчення перехідного процесу, а на АЧХ підсилювача частоту резонансу у правій частині графіку. Під кожним рисунком обов'язково зробити пояснюючий підпис, що містить умови і результат. Наприклад,

Рис. 6.1. Результат вимірювання перехідних процесів паралельного коливального контуру при $R_2 = 10 \text{ Ом}$

Рис. 6.2. Результат вимірювання перехідних процесів паралельного коливального контуру при $R_2 = 1 \text{ Ом}$

Щоб звіт відповідав вимогам оформлення, використовуйте цей файл як шаблон, додавши титульний аркуш та замінивши текст і рисунки.

9. Зробити висновки з результатів вимірювання тривалості перехідного процесу при різних значеннях опору R_2 .
10. Відповісти на контрольні питання.

Звіт оформити у текстовому файлі з назвою файлу **Лаб6_Прізвище_група.docx**.

Окрім звіту надіслати модель з встановленими для вашого варіанту параметрами і назвою **Лаб6_Прізвище_група.ms10**.

Контрольні запитання

1. Який сигнал необхідно подати на вхід кола або пристрою для вимірювання перехідних процесів?
2. Чи залежить тривалість перехідних процесів від добротності паралельного коливального контуру?
3. Чи треба налаштовувати час, відведений для аналізу перехідних процесів?
4. Коли необхідно збільшувати кількість точок аналізу при вимірюванні перехідних процесів?
5. Чи залежить частота вхідного сигналу для аналізу перехідних процесів від параметрів досліджуваного кола?
6. У якого паралельного більш тривалий перехідний процес – з меншою чи більшою добротністю? І чому?

Таблиця 5.2. Завдання на лабораторну роботу 5

| № варіанту | $R_2 = R_4$, Ом | R_H , Ом | Напруга $V_1=V_2$, В | № варіанту | $R_2 = R_4$, Ом | R_H , Ом | Напруга $V_1=V_2$, В |
|------------|------------------|------------|-----------------------|------------|------------------|------------|-----------------------|
| 1. | 30 | 32 | 18 | 2. | 91 | 10 | 6 |
| 3. | 33 | 30 | 17 | 4. | 100 | 9,1 | 5 |
| 5. | 36 | 27 | 16 | 6. | 110 | 8 | 4 |
| 7. | 39 | 24 | 15 | 8. | 120 | 7 | 18 |
| 9. | 42 | 21 | 14 | 10. | 130 | 6 | 17 |
| 11. | 47 | 20 | 13 | 12. | 150 | 5 | 16 |
| 13. | 51 | 18 | 12 | 14. | 160 | 4 | 15 |
| 15. | 56 | 16 | 11 | 16. | 180 | 6 | 14 |
| 17. | 62 | 15 | 10 | 18. | 200 | 8 | 13 |
| 19. | 68 | 13 | 9 | 20. | 210 | 10 | 12 |
| 21. | 75 | 12 | 8 | 22. | 240 | 12 | 11 |
| 23. | 82 | 11 | 7 | 24. | 91 | 10 | 6 |

Лабораторна робота №7. Вимірювання ємності конденсаторів

Мета роботи: ознайомитись з методами вимірювання ємності конденсаторів.

7.1 Теоретичні відомості

7.1 Мостовий метод вимірювання ємності

Для вимірювання параметрів ємності використовують мости змінного струму. Такі мости працюють на частоті 50 Гц, або на частоті 1000 Гц. Існують модифікації мостів високої частоти у яких частота генератора що живить міст сягає декількох десятків мегагерц.

Рівняння рівноваги моста змінного струму (рис. 7.1) має вигляд:

$$\dot{Z}_x \dot{Z}_2 = \dot{Z}_0 \dot{Z}_1,$$

де $\dot{Z}_x, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0, \dot{Z}_1$ – комплексні значення опорів плеч моста.

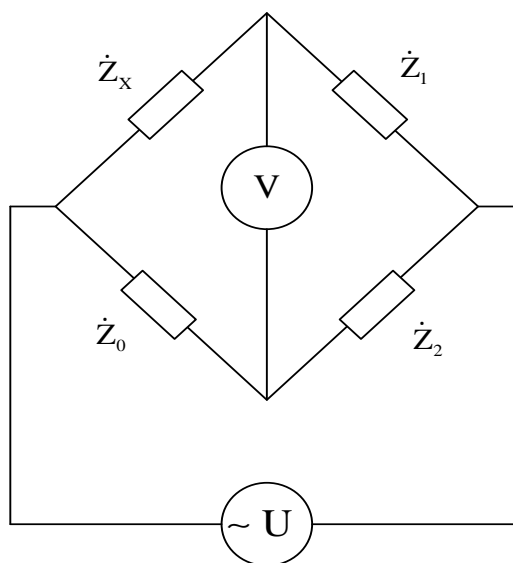


Рис. 7.1. Функціональна схема моста змінного струму

Враховуючи, що $\dot{Z} = Ze^{j\varphi}$, то рівняння рівноги можна записати таким чином:

$$Z_x Z_2 e^{j(\varphi_x + \varphi_2)} = Z_0 Z_1 e^{j(\varphi_0 + \varphi_1)}.$$

Така рівність виконується при виконанні двох умов:

1. Рівності добутків модулів $Z_x Z_2 = Z_0 Z_1$.
2. Рівності суми фазових кутів $\varphi_x + \varphi_2 = \varphi_0 + \varphi_1$.

З наведених умов випливає, що якщо в двох суміжних плечах моста ввімкнені активні опори, то в двох інших його суміжних плечах повинні бути ввімкнені однорідні елементи – дві ємності, або дві індуктивності. З'єднання елементів у схемах заміщення повинні бути або тільки послідовні (рис. 7.2), або паралельні (рис. 7.3).

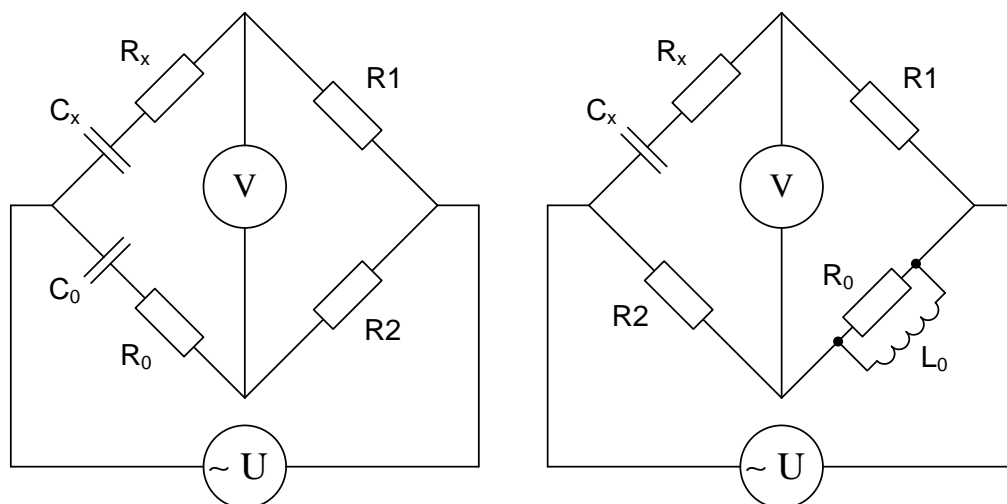


Рис. 7.2. Мостові схеми для вимірювання ємності при послідовній схемі заміщення

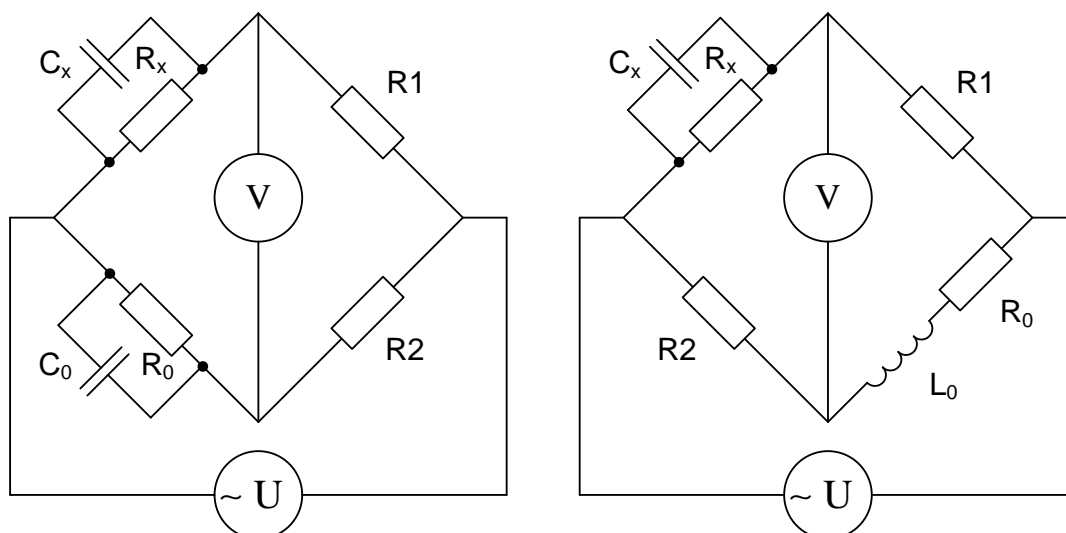


Рис. 7.3. Мостові схеми для вимірювання ємності при паралельній схемі заміщення

Врівноваження моста здійснюють зміною опорів зразкового резистора і ємності зразкового

конденсатора. Рівняння рівноваги моста має такий вигляд:

$$\left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) R_2 = \left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0} \right) R_1,$$

звідки випливають дві умови:

$$R_X = \frac{R_1 R_0}{R_2},$$

$$C_X = \frac{R_2 C_0}{R_1}.$$

Виконати ці умови можливо при використанні змінних опорів та конденсатора для балансування вимірювального моста.

7.2 Моделювання вимірювання ємності мостовим методом

Розглянемо приклад вимірювання ємності при послідовній схемі заміщення, наведеній на рис. 7.2. Модель для вимірювання мостовим методом наведена на рис. 7.4.

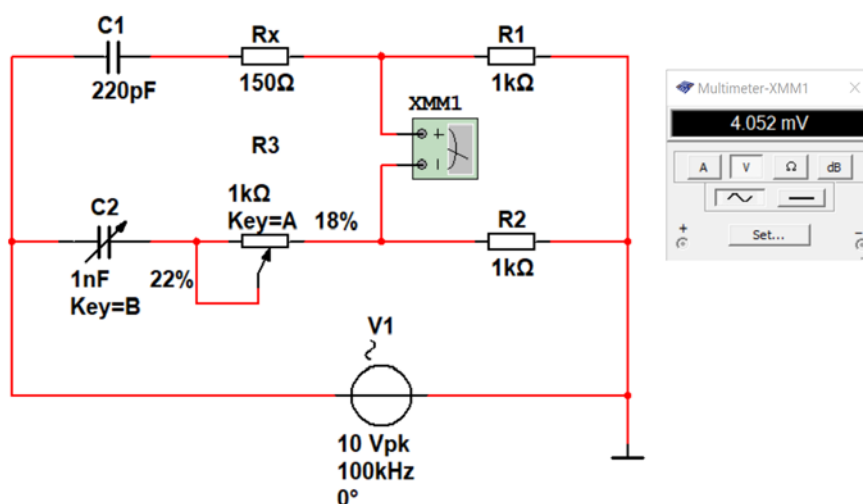


Рис. 7.4. Модель для вимірювання ємності мостовим методом при послідовній схемі заміщення

Вимірювання ємності мостовим методом доволі трудомісткий процес. Це відбувається тому що потрібно змінюючи два параметри знайти мінімальне значення напруги у діагоналі моста (тобто мінімум показань вольтметра). Міст буде збалансований коли $C_1 = C_2$, а $R_X = R_3$.

7.3 Вимірювання ємності резонансним методом

Відомо, що частота резонансу коливального контуру залежить від ємності конденсатора та індуктивності котушки контуру. Частота резонансу та параметри елементів контуру зв'язані співвідношенням $f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$.

Сутність методу полягає у використанні еталонної котушки індуктивності з відомими параметрами, або набору котушок для розширення діапазону вимірюваних ємностей. При малих значеннях ємності індуктивність повинна бути меншою, а при великих значеннях ємності – більшою.

Розглянемо вимірювання ємності таким способом на прикладі.

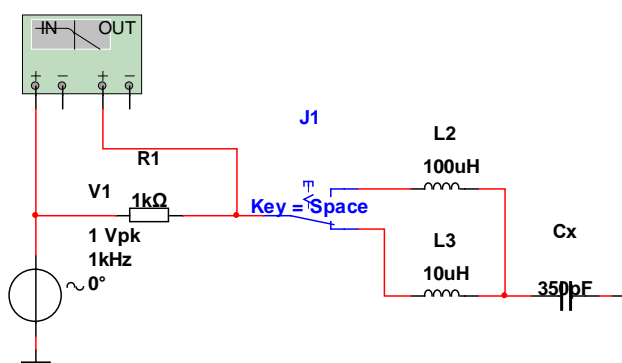


Рис. 7.5. Модель для вимірювання ємності резонансним методом

На рис. 7.6 наведено результати вимірювання резонансної частоти для моделі наведеної на рис. 7.5.

Як слідує з рис. 7.6 резонансна частота при використанні еталонної котушки з індуктивністю 10 мкГн дорівнює $f_0 = 2,691$ МГц. Знаючи індуктивність котушки та резонансну частоту можна розрахувати значення ємності C_x за формулою $C_x = 1 / (4\pi^2 L f_0^2)$.

Розрахуємо ємність за результатами вимірювання резонансної частоти:

$$C_x = 1 / (4\pi^2 L f_0^2) = 1 / (4 \cdot 3,14^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} (2,691 \cdot 10^6)^2) = 349,79^{-12} \approx 350 \text{ пФ}.$$



Рис. 7.6. Результати вимірювання резонансної частоти

Як слідує з розрахунку, отримане значення ємності співпадає з ємністю конденсатора у моделі на рис. 7.5. В реальних пристроях автоматично здійснюється розрахунок величини ємності.

7.4 Вимірювання ємності шляхом заряду конденсатора

Принцип вимірювання ємності шляхом заряду конденсатора постійним струмом, величина якого відома, полягає у вимірюванні часу заряду конденсатора до заданого рівня. Напруга на конденсаторі при його зарядженні постійним струмом описується формулою:

$$U_{C_X} = \frac{i_3 t_3}{C_X},$$

де i_3 – струм заряду конденсатора, t_3 – час заряду конденсатора.

Знаючи час заряду можемо знайти ємність конденсатора:

$$C_X = \frac{i_3 t_3}{U_{C_X}} = t_3 \frac{i_3}{U_{C_X}} = K_3 t_3,$$

де K_3 – постійний коефіцієнт, що задається користувачем.

Розглянемо на прикладі вимірювання ємності таким методом. Задамо значення струму заряду 1 мА і напругу до якої буде заряджатися конденсатор рівною 5 В.

Тоді $K_3 = 1 \cdot 10^{-3} / 5 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ См (Сіменс). Виміряємо час заряду конденсатора за допомогою осцилографа, як показано на рис. 7.7. Для того щоб можна було зафіксувати момент початку заряду конденсатора використовується ключ J1, що управляється напругою. Поки на виході генератора встановлений високий рівень напруги (+5 В) ключ замкнений і конденсатор не

заряджається, бо весь струм протікає через замкнений на загальний провід ключ. Коли напруга на виході генератора дорівнює нулю, ключ розмикається і починається заряд конденсатора від джерела струму. Осцилограми сигналів на виході генератора та напруги на конденсаторі наведені на рис. 7.8.

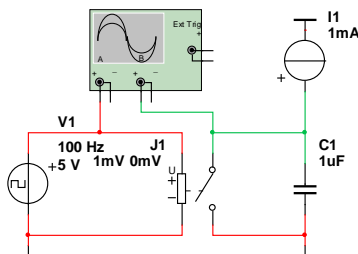


Рис. 7.7. Модель для вимірювання часу заряду конденсатора

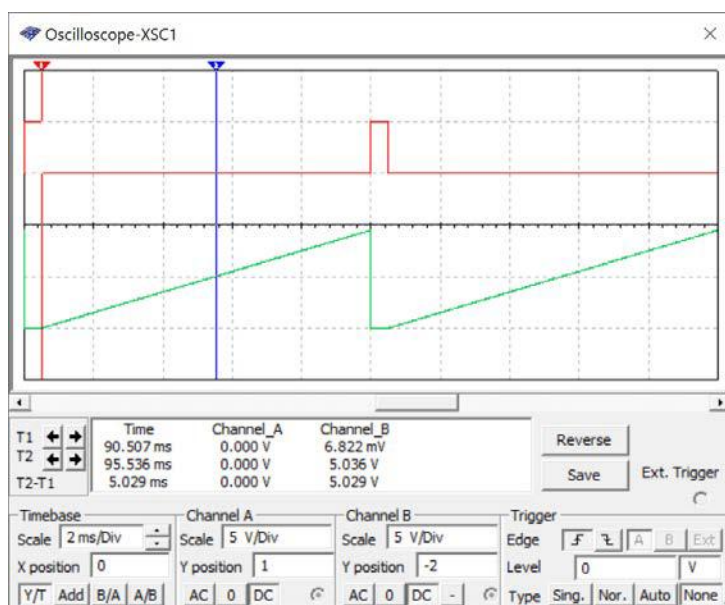


Рис. 7.8. Осцилограми сигналів на виході генератора (червона)
та напруги на конденсаторі

Час заряду конденсатора до напруги 5 В приблизно дорівнює 5 мс ($5 \cdot 10^{-3}$ с). Знайдемо C_X :

$$C_X = K_3 t_3 = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 1 \text{ мкФ}.$$

Якщо ємність буде меншою, то треба зробити струм заряду меншим. Наприклад, треба виміряти ємність приблизно 0,1 мкФ. Якщо залишити струм 1 мА, то час заряду конденсатора до рівня 5 В буде 0,5 мс, а якщо струм заряду зробити рівним 0,1 мА (100 мкА), то час заряду знов буде 5 мс. Це означає, що треба спочатку зробити орієнтовний розрахунок часу заряду при

заданому струмі заряду і значенні напруги на конденсаторі. Якщо цього не зробити, то можемо отримати невірний результат, або неможливість вимірювання.

Розглянемо ще один приклад. Залишимо струм заряду 1 мА, а ємність конденсатора візьмемо 100 нФ (рис. 7.9).

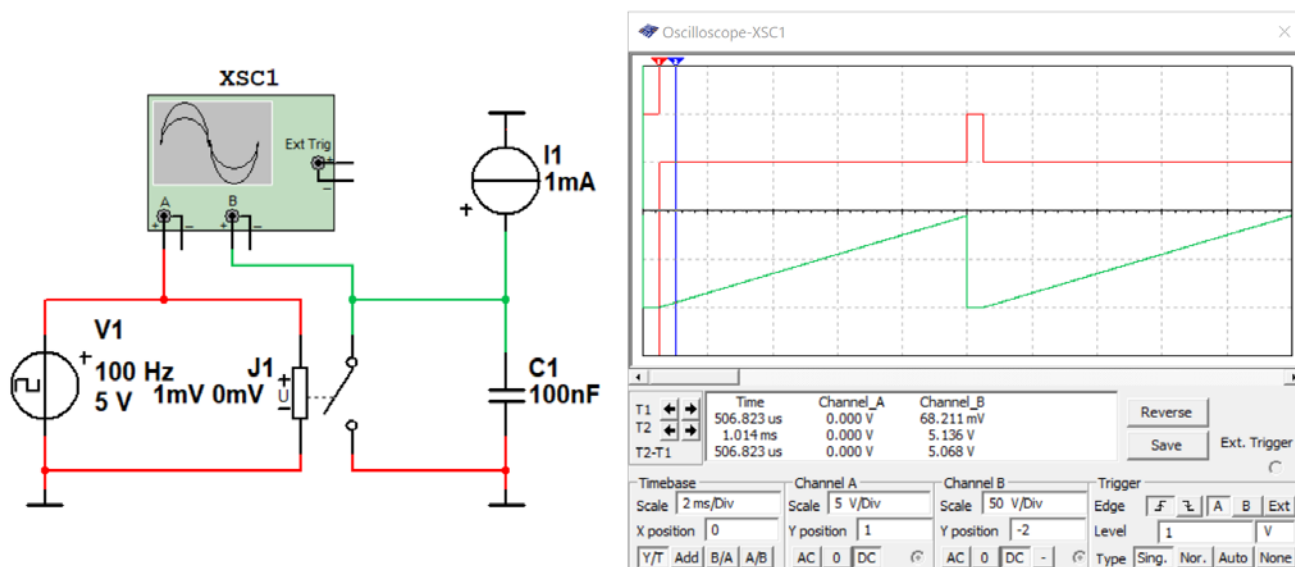


Рис. 7.9. Результати вимірювання часу заряду конденсатора ємністю 100 нФ струмом 1 мА

Як видно з рис. 7.9, вимірювання здійснюється на початковій ділянці напруги заряду конденсатора. Точність вимірювання осцилографом буде значно меншою ніж у попередньому випадку. Можна збільшити масштаб по осі X (рис. 7.10), але тоді не видно кінця процесу. Чим менша ємність, тим швидше вона заряджається, тим менший інтервал часу знадобиться для заряду ємності до заданої напруги. Як слідує з рис. 7.10, час заряду становить 506,8 мкс, що відповідає значенню ємності 113,6 нФ.

Спробуємо задати струм заряду конденсатора 10 мкА. Результати вимірювання наведені на рис. 7.11.

Як слідує з рис. 7.11 напруга на конденсаторі встигла зрости тільки до 1 В. Отже потрібно або збільшити струм заряду не менше ніж у 5 разів (оскільки заряд здійснюється по лінійному закону), або збільшити період слідування імпульсів більше ніж у 5 разів.

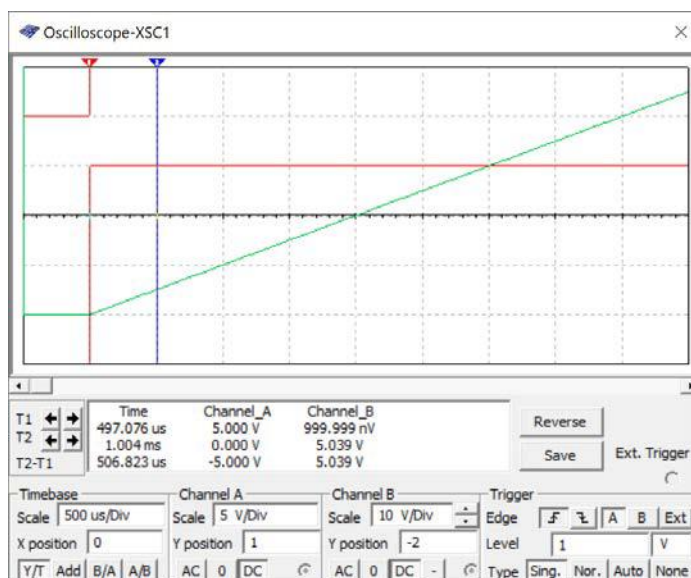


Рис. 7.10. Результати вимірювання часу заряду конденсатора ємністю 100 нФ струмом 1 мА при збільшених масштабах по обом осям

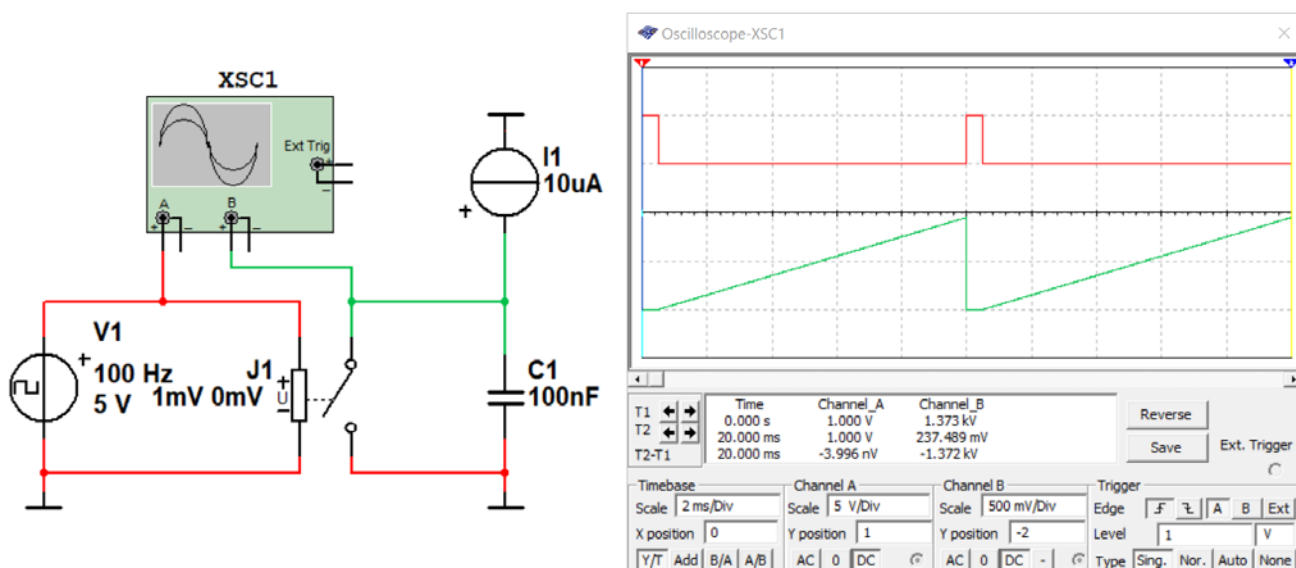


Рис. 7.11. Результати вимірювання часу заряду конденсатора ємністю 100 нФ струмом 10 мкА при періоді слідування імпульсів запуску 10 мс

При періоді слідування імпульсів 100 мс (10 Гц) напруга на конденсаторі встигає зрости до рівня більше ніж 5 В (рис. 7.12). Вимірний інтервал часу становить 49,9 мс, а розраховане значення ємності буде дорівнювати:

$$C_X = \frac{i_3 t_3}{U_{C_X}} = 49,9 \cdot 10^{-3} \frac{10 \cdot 10^{-6}}{5} = 99,8 \cdot 10^{-9} = 99,8 \text{ нФ}.$$

Цей експеримент показав, що точність вимірювання значно зросла і розрахована ємність дуже близька до ємності конденсатора C_X .

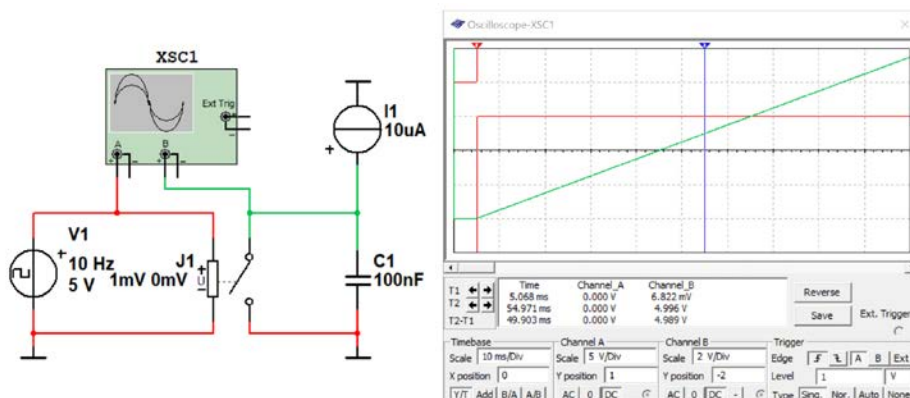


Рис. 7.12. Результати вимірювання часу заряду конденсатора ємністю 100 нФ струмом 10 мкА при періоді слідування імпульсів запуску 100 мс

З проведених експериментів можна зробити висновок про необхідність попередньої оцінки потрібного струму заряду і часу потрібного для заряду конденсатора до заданого рівня напруги. Це дозволить вірно обрати період слідування імпульсів запуску.

Спростити вимірювання можна, якщо зробити коефіцієнт K_3 кратним 10 у якомусь ступеню. Наприклад, $K_3 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ A} / 5 \text{ V} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ См}$ (Сіменс). Тобто задавши струм заряду 50 мкА, ми отримуємо множник 10^{-7} і ємність буде розраховуватись за формулою $C_X = t_X \cdot 10^{-7}$.

Експеримент зі струмом заряду 50 мкА привів до результату наведеного на рис. 7.7. Вимірний час становить $9,981 \cdot 10^{-3}$, а розраховане значення ємності $C_X = 9,981 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-7} = 99,8 \text{ нФ}$. Це показує, що можна зробити таке вимірювання зручним для користувача.

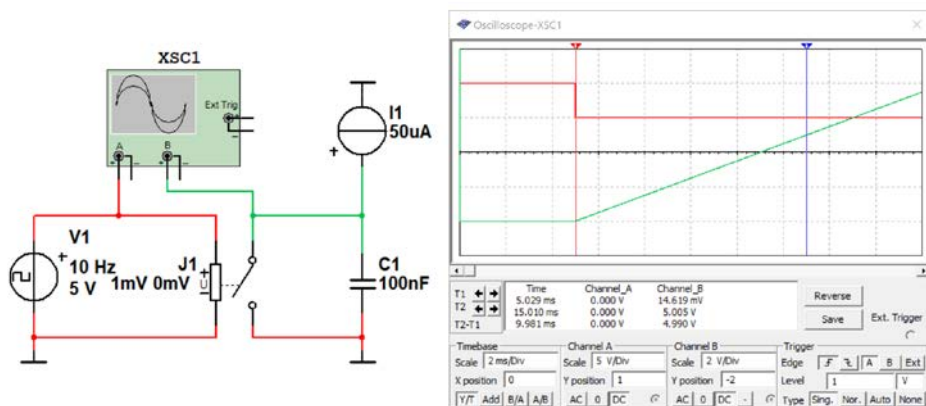


Рис. 7.7. Результати вимірювання часу заряду конденсатора ємністю 100 нФ струмом 50 мкА при періоді слідування імпульсів запуску 100 мс

В приладах, побудованих за таким принципом, час автоматично перераховується у ємність. Навіть не перераховується, а відображається з потрібними позначеннями одиниць вимірювання.

7.5 Завдання на роботу

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.

2. Відповісти на контрольні питання.

3. Виміряти ємність резонансним методом, використовуючи для цього модель **Вимірювання ємності резонансним методом.ms10**, встановивши свої параметри. Значення ємності для вимірювання наведені в табл. 7.1. Індуктивність для контуру обрати самостійно. Бажано щоб частота резонансу була вище 1 МГц і менше 10 МГц.

4. Виміряти ємність методом заряду конденсатора постійним струмом, використавши модель **Вимірювання ємності методом заряду конденсатора.ms10**. Попередньо обрати напругу для фіксації моменту заряду конденсатора до заданого рівня і розрахувати струм заряду конденсатора та період слідування імпульсів запуску для вимірювання ємності свого варіанту. Значення ємності для вимірювання задано в табл. 7.1.

7.6 Звіт про виконання лабораторної роботи

У звіті навести:

1. Завдання на виконання лабораторної роботи.

2. Схему моделі вимірювання ємності резонансним методом з відображенням екрану Бод-плоттера і курсором, встановленим на частоту резонансу. Навести розрахунок ємності за наведеним прикладом:

$$C_x = 1 / (4\pi^2 L f_0^2) = 1 / (4 \cdot 3,14^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} (2,691 \cdot 10^6)^2) = 349,79^{-12} \approx 350 \text{ пФ}.$$

3. Схему моделі вимірювання ємності методом заряду конденсатора постійним струмом і екран осцилографа з результатами вимірювання часу заряду конденсатора. Навести розрахунок струму і періоду слідування імпульсів запуску для заданого вами значення напруги. Навести розрахунок ємності за результатами вимірювання часу заряду конденсатора до заданого рівня.

Підписи під рисунками повинні мати такий вигляд:

Рис. 7.1. Результат вимірювання АЧХ резонансного контуру

Рис. 7.2. Результат вимірювання часу заряду конденсатори до напруги XX В

4. Зробити висновки з результатів вимірювання.

Звіт оформити у текстовому файлі з назвою файлу **Лаб7_Прізвище_група.docx**.

Окрім звіту надіслати моделі з встановленими для вашого варіанту параметрами і назвою **Лаб7_Прізвище_група_резонанс.ms10**.

П Лаб7_Прізвище_група_заряд.ms10.

Контрольні питання

1. Який метод вимірювання ємності найбільш зручний?
2. При якому методі вимірювання можна досягти найвищої точності на вашу думку?
Поясніть чому ви так вважаєте.
3. Від чого залежить точність вимірювання ємності резонансним методом?
4. Від чого залежить точність вимірювання ємності методом заряду конденсатора?
5. Чи потрібно враховувати значення вимірюваної ємності при виборі струму заряду конденсатора?
6. Чи потрібно враховувати значення вимірюваної ємності при виборі періоду слідування імпульсів запуску процесу вимірювання?

Таблиця 7.1. Завдання на лабораторну роботу 7

| № варіанту | Ємність конденсатора, пФ | № варіанту | Ємність конденсатора, пФ |
|------------|--------------------------|------------|--------------------------|
| 1. | 120 | 2. | 470 |
| 3. | 130 | 4. | 510 |
| 5. | 150 | 6. | 560 |
| 7. | 180 | 8. | 620 |
| 9. | 200 | 10. | 680 |
| 11. | 220 | 12. | 750 |
| 13. | 270 | 14. | 820 |
| 15. | 300 | 16. | 910 |
| 17. | 330 | 18. | 1000 |
| 19. | 360 | 20. | 1100 |
| 21. | 390 | 22. | 1200 |
| 23. | 430 | 24. | 470 |

Лабораторна робота №8. Вимірювання індуктивності котушок

Мета роботи: ознайомитись з методами вимірювання індуктивності котушок.

8.1 Теоретичні відомості

8.1.1 Мостовий метод вимірювання індуктивності

Для вимірювання параметрів котушок індуктивності використовують мости змінного струму. Такі мости працюють на частоті 50 Гц, або на частоті 1000 Гц. Існують модифікації мостів високої частоти у яких частота генератора що живить міст сягає декількох десятків мегагерць.

Рівняння рівноваги моста змінного струму (рис. 8.1) має вигляд:

$$\dot{Z}_x \dot{Z}_2 = \dot{Z}_0 \dot{Z}_1,$$

де $\dot{Z}_x, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0, \dot{Z}_1$ – комплексні значення опорів плеч моста.

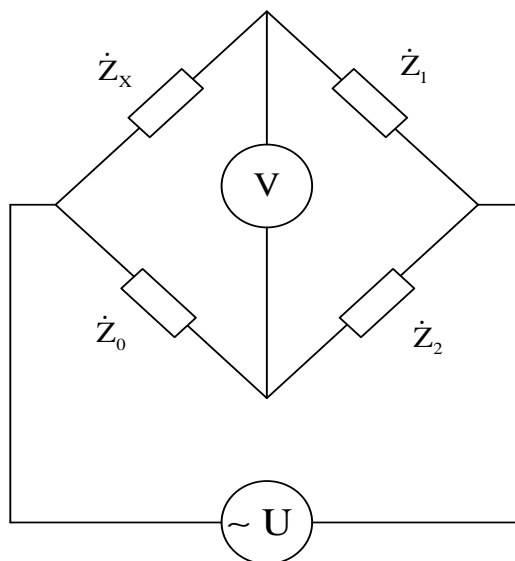


Рис. 8.1. Функціональна схема моста змінного струму

Рівність виконується при виконанні двох умов:

1. Рівності добутків модулів $Z_x Z_2 = Z_0 Z_1$.
2. Рівності суми фазових кутів $\varphi_x + \varphi_2 = \varphi_0 + \varphi_1$.

З наведених умов випливає, що якщо в двох суміжних плечах моста ввімкнені активні опори, то в двох інших його суміжних плечах повинні бути ввімкнені однорідні елементи – дві

ємності, або дві індуктивності. З'єднання елементів у схемах заміщення повинні бути або послідовні, або паралельні.

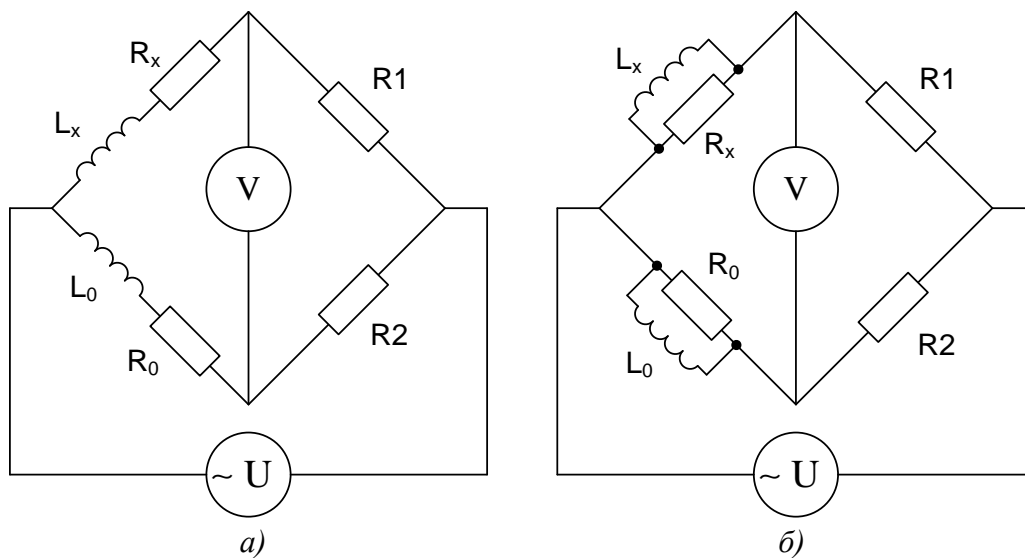


Рис. 8.2. Мостові схеми вимірювання індуктивності (а) та ємності (б) при паралельній схемі заміщення

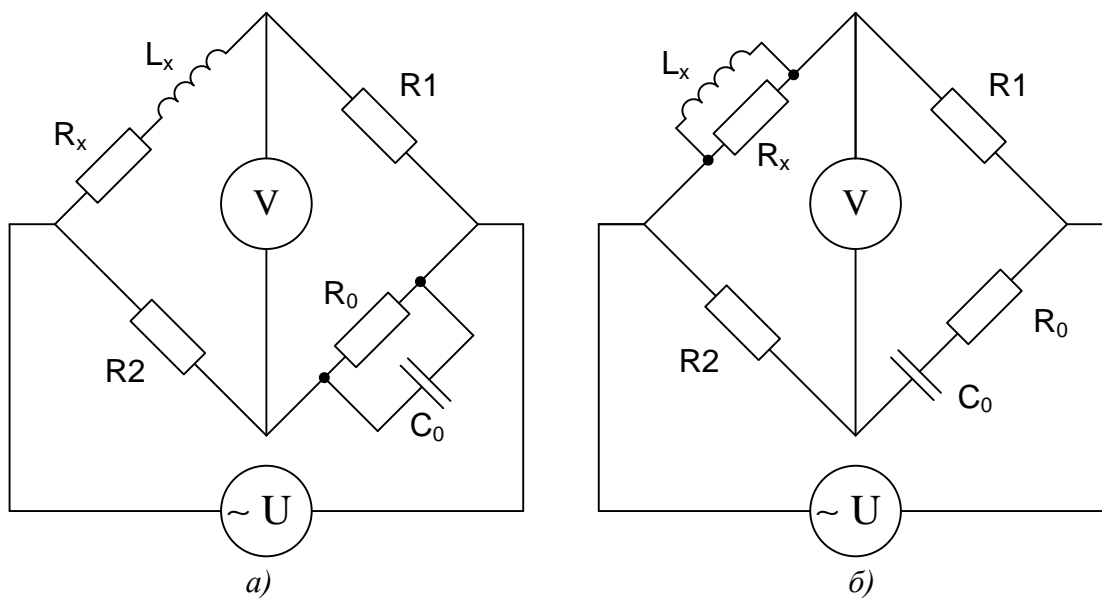


Рис. 8.3. Мостові схеми вимірювання індуктивності при послідовній схемі заміщення (а) та паралельній (б)

8.1.2 Вимірювання індуктивності мостовим методом

Розглянемо приклад вимірювання індуктивності при послідовній схемі заміщення, наведений на рис. 8.2,а. Модель для вимірювання мостовим методом наведена на рис. 8.4.

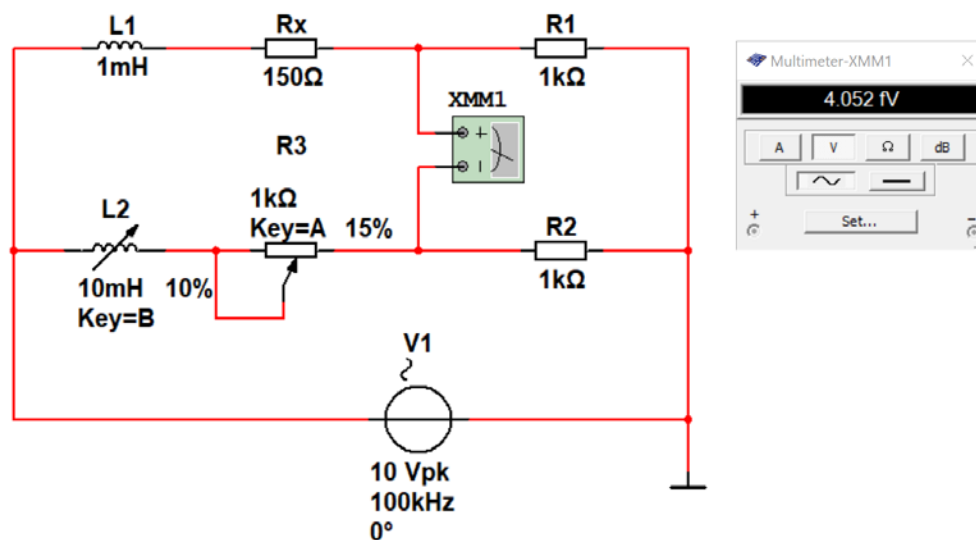


Рис. 8.4. Модель для вимірювання індуктивності мостовим методом при послідовній схемі заміщення

Вимірювання індуктивності мостовим методом аналогічний вимірюванню ємності. Треба збалансувати міст таким чином, щоб напруга у діагоналі де включений вольтметр була мінімальною. Міст буде збалансований коли $L_1 = L_2$, а $R_X = R_3$.

З рис. 8.4 слідує, що при мінімальному значенні напруги, що показує мультиметр, індуктивність $L_2 = 10 \cdot 0,1 \text{ мГн} = 1 \text{ мГн}$, а опір $R_3 = 1 \cdot 0,15 \text{ кОм} = 150 \text{ Ом}$. З цього слідує що умови балансу моста виконані.

8.1.3 Вимірювання індуктивності резонансним методом

Відомо, що частота резонансу коливального контуру залежить від ємності конденсатора та індуктивності котушки контуру. Частота резонансу та параметри елементів контуру зв'язані співвідношенням $f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$.

Сутність методу детально описана у способі вимірювання ємності резонансним методом. Нагадаємо деякі положення цього методу. Для вимірювання індуктивності резонансним методом потрібно мати еталонний конденсатор з відомою ємністю. На практиці використовують набір

конденсаторів різної ємності для вимірювання значення індуктивності котушок у широкому діапазоні значень.

Розглянемо вимірювання індуктивності таким способом на прикладі.

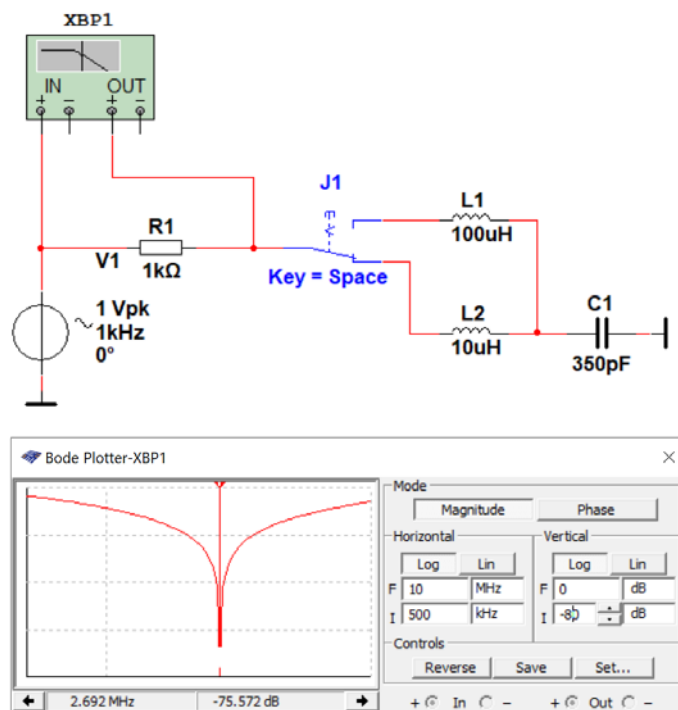


Рис. 8.5. Модель для вимірювання індуктивності резонансним методом

Як слідує з рис. 8.5 резонансна частота контуру складає 2,692 МГц. Знаючи ємність еталонного конденсатора C1, можна розрахувати індуктивність L2 за формулою:

$$L_x = 1 / (4\pi^2 C_1 f_0^2) = 1 / (4 \cdot 3,14^2 \cdot 350 \cdot 10^{-12} (2,691 \cdot 10^6)^2) = 349,79 \cdot 10^{-12} \approx 9,994 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Як слідує з результатів розрахунку, виміряне значення індуктивності співпадає з вказаним на схемі. Похибка не перевищує 0,06%.

8.1.4 Вимірювання індуктивності шляхом вимірювання значення напруги

Як відомо, індуктивний опір котушки індуктивності дорівнює $x_L = 2\pi f_c$, де f_c – частота струму, що протікає через котушку. Якщо котушка має активний опір (на практиці це завжди виконується), то тоді комплексний опір котушки дорівнює $z_L = \sqrt{x_L^2 + R_L^2}$, де R_L – активний опір котушки індуктивності.

Принцип вимірювання індуктивності полягає в наступному. Через котушку індуктивності пропускають змінний струм і вимірюють напругу на котушці. Виміряна напруга в ідеальному випадку (котушка не має активного опору, тобто ідеальна) буде дорівнювати:

$$U_L = 2\pi f_c L i_c = x_L i_c.$$

Знаючи напругу, величину струму та частоту сигналу, можна розрахувати значення x_L , а потім і значення індуктивності:

$$x_L = U_L / i_c,$$

а знаючи x_L можна розрахувати індуктивність $L = 1/2\pi f_c x_L$.

При наявності активного опору в котушці задача ускладнюється, бо потрібно виміряти значення активного опору. Активний опір можна виміряти пропустивши постійний струм через котушку. Індуктивний опір на постійному струмі дорівнює нулю.

На рис. 8.6 наведена модель для вимірювання індуктивності методом вимірювання змінної напруги, що падає на котушці при пропусканні через неї змінного струму з відомими частотою та величиною.

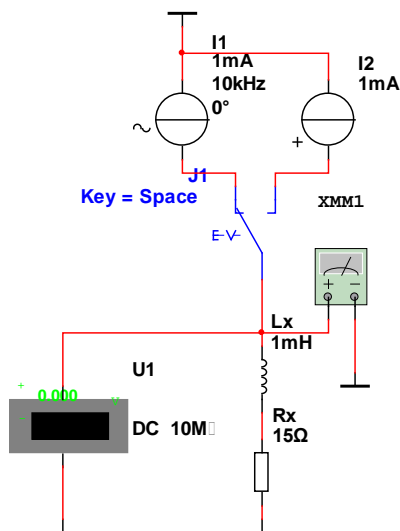


Рис. 8.6. Модель для вимірювання індуктивності методом вимірювання напруги з використанням джерела змінного

Модель містить два генератора струму:

- I1 – для вимірювання комплексного опору на змінному струмі;
- I2 – для вимірювання активного опору на постійному струмі.

Для зручності вимірювань використано два вимірювальних пристрої – вольтметр постійного струму U1 та мультиметр для вимірювання змінної напруги. Можна обійтись одним мультиметром. Однак при цьому доведеться перемикати вимірювання напруги змінного та постійного струму.

Проведемо дослід з цією моделлю. Спочатку виміряємо падіння напруги на котушці Lx на змінному струмі. Результат вимірювання наведений на рис. 8.7.

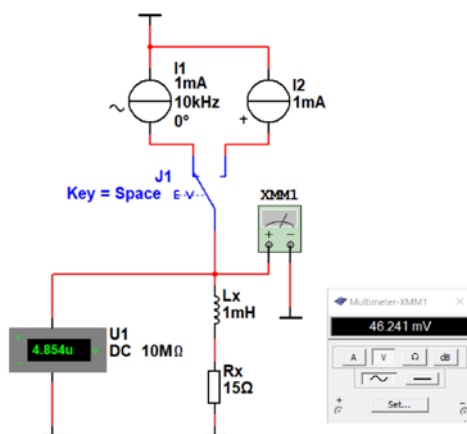


Рис. 8.7. Результат вимірювання падіння змінної напруги на котушці при частоті струму 10 кГц

Наступне вимірювання напруги зробимо при використанні генератора постійного струму. Результат вимірювання наведений на рис. 8.8.

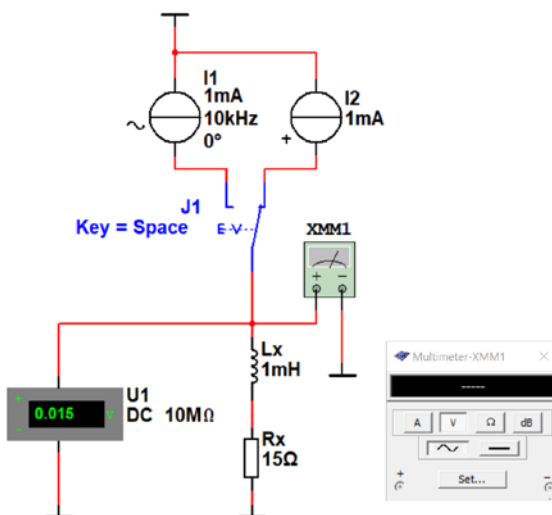


Рис. 8.8. Результат вимірювання падіння постійної напруги на котушці

За результатами вимірювання можемо записати значення вимірюної напруги: $U_R = 15$ мВ, $U_{zLeф} = 46,24$ мВ на частоті 10 кГц. **Треба пам'ятати, що мультиметр вимірює ефективне значення напруги, а генератор формує струм, що заданий у амплітудних значеннях. Тому потрібно перевести показання мультиметра в амплітудне значення $U_{zLампл} = U_{zLeф} \cdot \sqrt{2} = 46,24 \cdot 1,41 = 65,4$ мВ.**

Знаючи $U_{xLампл}$, струм та його частоту, можемо розрахувати комплексний опір котушки індуктивності:

$$z_L = \frac{U_{xLампл}}{i_c} = \frac{46,24 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,41 = 65,38 \text{ Ом.}$$

Тепер можна знайти індуктивний опір:

$$x_L = \sqrt{z_L^2 - R_L^2} = \sqrt{z_L^2 - (U_R / i_c)^2} = \sqrt{(65,38)^2 - (15 \cdot 10^{-3} / 1 \cdot 10^{-3})^2} = \sqrt{4274,5444 - 225} = 63,63 \text{ Ом.}$$

Залишилось розрахувати $L = x_L / (2\pi f_c) = 63,63 / (6,28 \cdot 10^4) = 1,013$ мГн.

Враховуючи, що у моделі задана індуктивність 1 мГн, то похибка вимірювання складає 1,3%, що є досить непоганим результатом.

Спробуємо виміряти індуктивність на більш високій частоті. Наприклад, на частоті генератора змінного струму 100 кГц (рис. 8.9).

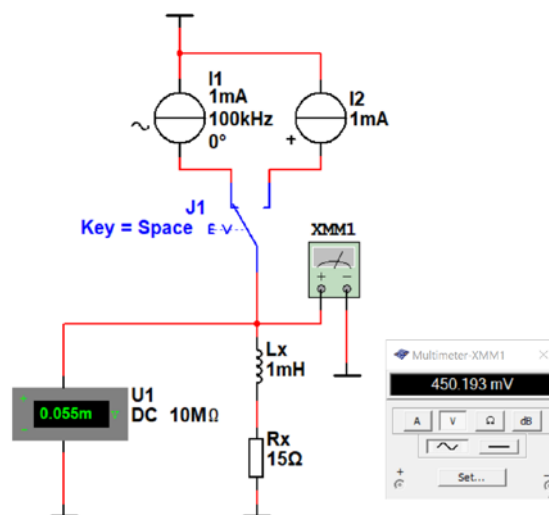


Рис. 8.9. Результат вимірювання падіння змінної напруги на котушці при частоті струму 100 кГц

Переводимо показання мультиметра в амплітудне значення:

$$U_{zL_{ампл}} = U_{zL_{эф}} \cdot \sqrt{2} = 450,19 \cdot 1,41 = 636,7 \text{ мВ.}$$

Знаючи $U_{xL_{ампл}}$ розрахуємо комплексний опір котушки індуктивності:

$$z_L = \frac{U_{xL_{ампл}}}{i_c} = \frac{636,7 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,41 = 900,2 \text{ Ом.}$$

Тепер можна знайти індуктивний опір:

$$\begin{aligned} x_L &= \sqrt{z_L^2 - R_L^2} = \sqrt{z_L^2 - R^2} = \sqrt{(636,7)^2 - 225} = \\ &= \sqrt{405386,89 - 225} = 636,5 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Залишилось розрахувати $L = x_L / (2\pi f_c) = 636,5 / (6,28 \cdot 10^5) = 1,013 \text{ мГн.}$

Тобто, практично, похибка вимірювання не змінилася.

8.2 Завдання на роботу

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.

2. Відповісти на контрольні питання.

3. Виміряти індуктивність резонансним методом, використовуючи для цього модель **Вимірювання індуктивності резонансним методом.ms10**, встановивши свої параметри. Значення індуктивності для вимірювання наведені в табл. 8.1 та 8.2. Ємність еталонного конденсатора для контуру обрати самостійно. Бажано щоб частота резонансу була вище 1 МГц і менше 10 МГц.

4. Виміряти індуктивність мостовим методом, використавши модель **Вимірювання індуктивності мостовим методом.ms10**. Значення індуктивності та активного опору котушки для вимірювання задано в табл. 8.1 і 8.2. Змінний резистор для балансування моста треба обирати 1 кОм при значенні опору котушки менше ніж 100 Ом і 1 кОм при значенні опору котушки більше 100 Ом. Частоту генератора змінного струму доцільно обирати кратну 10 і не нижче 10 кГц: 10, 100 або 1000 кГц.

8.3 Звіт про виконання лабораторної роботи

У звіті навести:

1. Завдання на виконання лабораторної роботи.
2. Схему моделі вимірювання індуктивності резонансним методом з відображенням екрану Бодє-плоттера і курсором, встановленим на частоту резонансу. Навести розрахунок індуктивності за наведеним прикладом
3. $L_x = 1 / (4\pi^2 C f_0^2) = 1 / (4 \cdot 3,14^2 \cdot 350 \cdot 10^{-12} (2,691 \cdot 10^6)^2) = 1,006^{-3} \approx 1 \text{ мГн.}$
4. Схеми моделі при вимірювання індуктивності мостовим методом з виміряним значенням, що відображається на мультиметрі. Навести розрахунок індуктивності та активного опору котушки за результатами балансування моста.

Підписи під рисунками повинні мати такий вигляд

Рис. 8.1. Результат вимірювання АЧХ резонансного контуру

Рис. 8.2. Результат вимірювання індуктивності мостовим методом

1. Зробити висновки з результатів вимірювання.

Звіт оформити у текстовому файлі з назвою файлу **Лаб8_Прізвище_група.docx**.

Окрім звіту надіслати моделі з встановленими для вашого варіанту параметрами і назвою **Лаб8_Прізвище_група_резонанс.ms10**.

Лаб8_Прізвище_група_мостовий.ms10.

Контрольні питання

1. Який з методів вимірювання індуктивності забезпечує найменшу похибку вимірювань?
2. Які умови потрібно виконати для балансування моста змінного струму при вимірюванні індуктивності?
3. Чи залежить індуктивний опір від частоти?
4. Навіщо потрібно перераховувати значення відображені на екрані мультиметра?
5. Чи залежить комплексний опір котушки індуктивності від її активного опору?
6. Як розрахувати комплексний опір котушки індуктивності?

Таблиця 8.1. Завдання на лабораторну роботу 8

| № варіанту | Індуктивність катушки, мкГн | R_L , Ом | № варіанту | Індуктивність катушки, мкГн | R_L , Ом |
|------------|--------------------------------|------------|------------|--------------------------------|------------|
| 1. | 120 | 10 | 2. | 470 | 43 |
| 3. | 130 | 12 | 4. | 510 | 47 |
| 5. | 150 | 15 | 6. | 560 | 51 |
| 7. | 180 | 18 | 8. | 620 | 62 |
| 9. | 200 | 20 | 10. | 680 | 68 |
| 11. | 220 | 22 | 12. | 750 | 75 |
| 13. | 270 | 24 | 14. | 820 | 82 |
| 15. | 300 | 27 | 16. | 910 | 91 |
| 17. | 330 | 30 | 18. | 1000 | 100 |
| 19. | 360 | 33 | 20. | 1100 | 110 |
| 21. | 390 | 36 | 22. | 1200 | 120 |
| 23. | 430 | 39 | 24. | 470 | 43 |

Література

1. Вступ до техніки вимірювань: навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. / В.В. Макаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 10,02 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.
2. Данилин А. А., Лавренко Н. С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное пособие / Под ред. А. А. Данилина. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 408 с.
3. Метрология и электрические измерения: Учеб. пособие / Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин, А.П. Зарубин; Под ред. Е.Д. Шабалдина. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.- пед. ун-т», 2006. 282 с.
4. Поздняков, А. Д. Курс лекций по дисциплине «Метрология и радиоизмерения». В 2 ч. Ч. 1 / А. Д. Поздняков ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 164 с.
5. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Ігнатенко О.Г., Войтович О.П. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 151 с.
6. Х. Харт Введение в измерительную технику. – М. Мир, 1998 г. – 388 с.
7. Програмні засоби проектування: Навч. посіб. для студ. спеціальності 171 "Електроніка" спеціалізації "Електронні та інформаційні системи і технології телебачення. кінематографії та звукотехніки" / В.В. Макаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 9.78 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 244 с.

